Quatro décadas de Ciência e ENGENHARIA DE MATERIAIS

Uma jornada acadêmica e suas contribuições

RÔMULO FEITOSA NAVARRO

Editora Poisson

Rômulo Feitosa Navarro

Quatro décadas de Ciência e Engenharia de Materiais:

uma jornada acadêmica e suas contribuições

1ª Edição

Belo Horizonte

Editora Poisson

2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
Ms. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N322 NAVARRO, Rômulo Feitosa

Quatro décadas de Ciência e Engenharia de Materiais: uma jornada acadêmica e suas contribuições / Rômulo Feitosa Navarro
Belo Horizonte - MG: Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-566-3
DOI: 10.36229/978-65-5866-566-3

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação I. NAVARRO, Rômulo Feitosa II. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

Autor

Rômulo Feitosa Navarro

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal da Paraíba (1985), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1989) e doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2002). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Polímeros, Aplicações, atuando principalmente nos seguintes temas: reologia de suspensões, reologia de polímeros, reologia, polímeros, compósitos e biomateriais.

Prefácio

Após 4 décadas de dedicação à vida acadêmica, o professor Rômulo Feitosa Navarro nos surpreende com uma iniciativa diferente: reunir algumas de suas principais contribuições na forma de um livro. Como o professor atuou em diversas áreas de ensino, pesquisa e administração universitária, a obra, por natureza, apresenta uma característica de ampla variedade de temas.

Coerente com a sua formação de engenheiro de materiais, Rômulo dedica os 4 primeiros capítulos a uma contextualização dos materiais na sociedade moderna, incluindo um descritivo sobre a história dos materiais, com discussões interessantes de como a evolução dos materiais acompanhou a trajetória humana e possibilitou o desenvolvimento tecnológico da sociedade. São textos bastante significativos e com argumentação consistente, que tratam dos materiais nos primórdios da civilização até novidades científicas como o grafeno e os materiais inteligentes. Tópicos relevantes nesse contexto, como sustentabilidade, economia circular e as diversas influências ambientais também são discutidos.

Posteriormente, o capítulo 6, intitulado "Serendipidade na Ciência e Engenharia de Materiais", nos chama muita atenção pois mostra com exemplos práticos como algumas descobertas altamente relevantes surgiram (quase) do acaso. Do aço inoxidável à vulcanização de borrachas, do vidro de segurança ao Teflon®, muitos materiais que são do nosso uso corriqueiro talvez não existissem se não tivesse ocorrido uma certa dose de sorte e casualidade durante alguma fase do desenvolvimento.

Como parte da sua carreira universitária foi dedicada à administração, o professor Navarro não poderia deixar de abordar os cursos de engenharia de materiais e os desafios da carreira profissional. Isso é feito nos capítulos 5 e 7. Analisa de forma bastante crítica a realidade atual, com dados oficiais sobre os cursos no Brasil e quantitativo de profissionais formados. Levanta discussões relevantes sobre como o meio acadêmico poderia fomentar uma formação profissional mais sólida e que atenda às transformações do mundo.

Na qualidade de um dos maiores especialistas brasileiros em reologia de polímeros, Rômulo apresenta 4 capítulos no tema, englobando desde a reologia de suspensões até situações que ocorrem na aplicação de biomateriais. Os capítulos resumem contribuições científicas e acadêmicas do autor nessa área. Como sabemos, reologia não é um assunto particularmente fácil, mas ele conseguiu sintetizar o que é de maior relevância para o leitor decifrar a essência de cada trabalho. Os capítulos estão muito bem referenciados, incluindo contribuições do próprio autor, facilitando o aprofundamento nos tópicos descritos.

O Professor Rômulo Feitosa Navarro não é propriamente um novato na produção de livros acadêmicos/científicos, muito pelo contrário, possui várias obras com significativas contribuições. Por compilar a essência de sua vida acadêmica, o presente livro apresenta uma boa diversidade de temas em um texto claro, assertivo, reflexivo e, em muitas ocasiões, provocador. Com grande capacidade intelectual, o autor se aprofunda em tudo que faz. Essa Jornada Acadêmica, como diz o título do livro, traduz muito bem a sua trajetória e pode ser importante fonte de consulta para gerações vindouras.

Campina Grande, 13 de agosto de 2025.

Dr. Marcelo Silveira Rabello
Ex-professor titular da UFCG.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Evolução dos materiais da pré-história às civilizações pré-colombianas 08

Capítulo 2: O papel transformador dos materiais na sociedade moderna: benefícios e avanços inovadores 40

Capítulo 3: História da ciência e engenharia de materiais e sua importância transformadora para a humanidade 55

Capítulo 4: Materiais e ambiente 76

Capítulo 5: A evolução dos cursos de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil: panorama histórico, desafios e perspectivas de mercado 84

Capítulo 6: Serendipidade na ciência e engenharia de materiais: descobertas ao acaso que moldaram o mundo moderno 97

Capítulo 7: Desafios atuais da engenharia de materiais 106

Capítulo 8: Fatores que afetam a concentração crítica de suspensões 114

Capítulo 9: Relação entre índice de fluidez e viscosidade aparente de polímeros pseudoplásticos 124

Capítulo 10: A Lei de Newton para a viscosidade e o surgimento da reologia 130

Capítulo 11: Envelhecimento por deformação e seu impacto na tensão de escoamento de materiais metálicos 161

Capítulo 12: Propriedades reológicas incomuns de alguns biomateriais e materiais biológicos 174

01 Evolução dos materiais da pré-história às civilizações pré-colombianas

Resumo: A evolução dos materiais, desde a pré-história até as civilizações pré-colombianas, reflete a jornada da humanidade em busca de sobrevivência e adaptação. Inicialmente, na Idade da Pedra (Paleolítico e Neolítico), o domínio das técnicas de lascamento e polimento de rochas impulsionou o desenvolvimento de ferramentas para caça e, posteriormente, o surgimento da agricultura e assentamentos sedentários, com a argila sendo crucial para construção e armazenamento. A transição para a Idade dos Metais marcou um avanço significativo com a metalurgia, permitindo a produção de armas e ferramentas mais eficazes, embora a datação e a progressão entre as idades do Cobre, Bronze e Ferro permaneçam em debate devido à complexidade das técnicas de liga e à deterioração de artefatos de ferro. As civilizações pré-colombianas, como os Incas, Maias e Astecas, demonstram a engenhosidade humana na utilização de recursos locais: os Incas se destacaram na engenharia de pontes de corda e na mineração de prata; os Maias desenvolveram o durável pigmento Azul Maia a partir de paligorsquita e índigo; e os Astecas, embora sem metalurgia avançada para ferramentas, foram pioneiros na produção de borracha a partir do látex. A história dos materiais, portanto, não é apenas um registro de avanços tecnológicos, mas um espelho da evolução social, econômica e cultural das sociedades humanas.

APRESENTAÇÃO

Este texto foi configurado a partir das publicações originais mencionadas nas referências (NAVARRO, 2006; NAVARRO, 2008).

1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento do Homem na Terra, o movimento do Homem e os assentamentos humanos tiveram sua origem em suas necessidades e na disponibilidade de recursos locais para satisfazê-las. A necessidade essencial, comum a todos os selvagens, era o alimento, e este vinha basicamente de proteína animal, ou seja, o Homem primitivo (homídeos) era um caçador. Como a caça não é realizada apenas com as mãos, os homídeos tiveram que construir ferramentas para poder caçar e obter seu alimento.

Embora fossem predominantemente nômades, quando descobriram um território fértil tanto em caça quanto em matérias-primas para a produção de artefatos domésticos e de caça, os homídeos tiveram que demarcar e defender o território correspondente contra os avanços de tribos semelhantes. A partir de então, surgiu a necessidade do desenvolvimento de artefatos de guerra, que representariam a força de uma tribo à medida que fossem mais poderosos e fabricados mais facilmente e em maior quantidade. A manutenção de vastos territórios e o crescimento populacional estavam diretamente relacionados à disponibilidade (alimento e matérias-primas) da área sob controle e à capacidade do grupo dominante de explorá-la e defendê-la satisfatoriamente. Quando uma dessas premissas não era atendida, as tribos, devido ao seu próprio comportamento nômade, partiam em busca de outros lugares. A incessante busca por alimento e/ou matérias-primas e/ou a dispersão causada por disputas territoriais fizeram com que os homídeos se movessem por áreas que eram frequentemente inóspitas, ou o próprio ambiente se mostrava assim durante as glaciações, e os povos primitivos tiveram que cobrir seus corpos, que estavam cada vez mais desprovidos de pelos. Os animais agora serviam não apenas como fonte de alimento, mas também como vestimenta (feita de suas peles) e ferramentas mais elaboradas (feitas de seus ossos e chifres). Mesmo naquela época, a caça não era tão abundante, então os hominídeos tiveram que domesticar e criar esses animais. Eles então se tornaram cada vez menos nômades e adotaram um estilo de vida sedentário, pelos padrões da época, à medida que desenvolviam a agricultura e a pecuária. Esse novo estilo de vida não apenas criou a necessidade de desenvolver outro tipo de ferramentas, mas também o estabelecimento de outro tipo de habitação: os hominídeos abandonaram as cavernas e começaram a construir suas primeiras moradias.

Durante suas viagens e em vista de suas novas necessidades, os hominídeos entraram em contato com rochas mais duras, cujas lascas produziam artefatos mais resistentes e afiados. Algumas delas, quando acesas em fogueiras para aquecer o corpo ou transformar alimentos, mostraram um comportamento até então desconhecido: amolecimento (fusão) e posterior endurecimento (solidificação); outras, por outro lado, menos consistentes, produziam pós que assumiam consistência quando úmidos, bem como certos depósitos de solo de regiões alagadas ou que anteriormente faziam parte de pequenos lagos que secaram. A partir desse ponto, os hominídeos, alguns dos quais já pertenciam à mesma espécie que o Homem moderno, tomaram consciência de novas e mais versáteis matérias-primas. Cada nova mudança no comportamento correspondia ao domínio e uso de uma nova matéria-prima, e aqueles mais eficientes nesse aspecto prevaleciam sobre os outros, principalmente porque, desde o início, as novas matérias-primas eram destinadas primeiro para fins de guerra e apenas mais tarde assumiam um

aspecto doméstico ou caseiro. Assim como hoje, aqueles que detinham o conhecimento e as reservas do que era considerado estratégico prevaleciam, e, assim como o alimento, os materiais sempre acompanharam o Homem ao longo de sua história evolutiva: quanto mais avançada a civilização, mais estratégicos os materiais à sua disposição e mais elaborados e eficientes os artefatos e equipamentos produzidos.[1]

2. AS ERAS DA HUMANIDADE E OS MATERIAIS

A estreita relação entre o Homem e os materiais foi tão significativa e importante, como ainda é, que diferentes eras da humanidade foram nomeadas em homenagem ao material mais importante em cada uma delas, desde a Idade da Pedra até a Idade dos Metais, passando pelas eras nomeadas em homenagem à civilização dominante em um determinado período (períodos Helênico, Romano, Bizantino e Islâmico), pela Era Moderna e chegando hoje ao que tem sido convencionalmente chamado de Era do Silício (OLSON, 2001). A datação de cada era é baseada em descobertas arqueológicas e no material que predominou nessas descobertas e nos sítios arqueológicos onde foram encontradas. Como a Arqueologia é a ciência das descobertas e a datação é baseada em análises cujos resultados não são muito precisos, estabelecer o início e a duração de cada era é sempre assunto de controvérsia, de modo que, dependendo da fonte consultada, pode haver às vezes variações significativas na distribuição cronológica de cada era.

Figura 1. Primeira tentativa de estabelecer uma sequência de eras baseada em materiais.

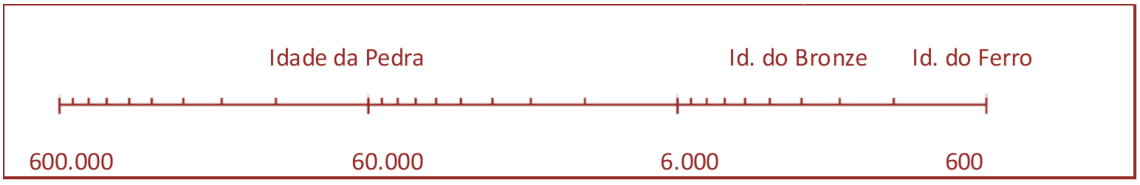


Figura 2. Distribuição cronológica atualmente mais aceita das eras da humanidade. (IC) Idade do Cobre; (IB) Idade do Bronze; (IF) Idade do Ferro. Os números acima referem-se a anos a.C.

As primeiras tentativas de estabelecer os períodos abrangidos por essas eras, considerando descobertas e análises superficiais, levaram ao estabelecimento da sequência mostrada na Figura 1. Análises posteriores mostraram que o que era considerado feito de bronze era, na verdade, feito de um metal contendo cobre (Cu) associado a impurezas como o arsênio (As). Assim, uma nova distribuição cronológica foi

feita assumindo a configuração mostrada na Figura 2. Dadas as configurações culturais e tecnológicas particulares de vários aglomerados de hominídeos em várias partes da Terra no mesmo período histórico, várias das eras foram divididas em duas ou mais eras secundárias.[1] Exemplos incluem as Idades do Bronze Antiga, Média e Tardia, de modo que uma classificação mais precisa é restrita a estudos e escritos arqueológicos, o que está além do escopo deste texto.

3. IDADE DA PEDRA

Conceitualmente, a Idade da Pedra é considerada o período que inclui o aparecimento das primeiras ferramentas produzidas pelo Homem (700.000/600.000 a.C.) e o início da Idade dos Metais. Esse período muito longo, que representa 98% do tempo de existência do Homem na Terra, para fins de melhor compreensão, é dividido em dois períodos principais: Paleolítico ou Pedra Lascada e Neolítico ou Pedra Polida. O período Paleolítico em si é subdividido em três partes, cada parte correspondendo a um avanço tecnológico no trabalho com pedra. No período inicial, descobertas em sítios na África, China e Sudeste Asiático mostram que os Australopitecos foram os primeiros a desenvolver a técnica primitiva de manuseio de pedras, seguidos pelo *Homo erectus* que desenvolveu as técnicas de lascamento para produção de machados. Esses machados eram obtidos pelo choque de uma pedra contra outra para produzir superfícies afiadas. Essa técnica foi posteriormente aperfeiçoada pelo uso de madeira e ossos de animais como instrumentos de lascar pedra em vez da própria pedra. Ainda no Paleolítico, em seu período médio, hominídeos já pertencentes à mesma espécie que o homem moderno, Homo sapiens, como o Homem de Neandertal e o Homem de Cro-Magnon, desenvolveram a técnica de talhe em pedra. Isso possibilitou a produção de artefatos mais elaborados, como instrumentos de raspar, pontas e lâminas de corte a partir de pequenas lascas de pedra (ver Figura 3a) e facas feitas de lascas de sílex (ver Figura 3b). Além de suas funções militares, esses novos instrumentos eram usados para caçar animais e separar carne para alimentação e pele e ossos para a produção de utensílios domésticos e vestuário, que agora eram necessários devido à quarta glaciação da Terra, que reduziu significativamente a temperatura ambiente. O aparecimento de itens como agulhas, cinzéis, pás e enxadas data desse período, reforçando a teoria da necessidade de vestuário, bem como de habitação, além das cavernas usadas até então. As pedras tornaram-se fontes de matérias-primas para móveis e outras peças que representavam um status mais elevado ou imitavam formas humanas (ver Figura 4) (HAYDEN, 1993).

Figura 3. a) Instrumento de perfuração e b) faca de sílex (NAVARRO, 2006).

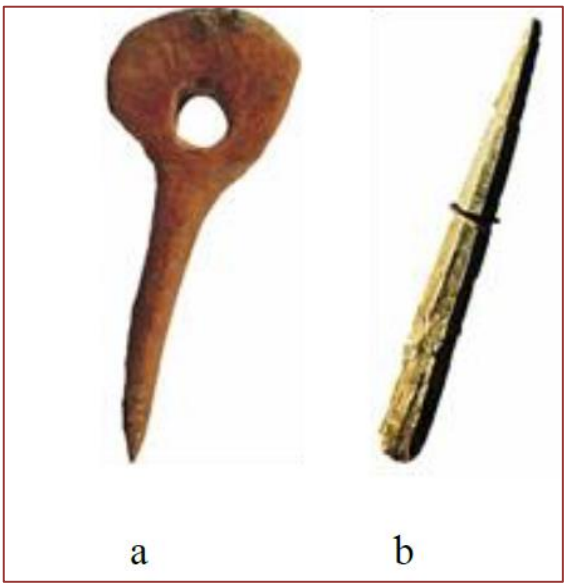
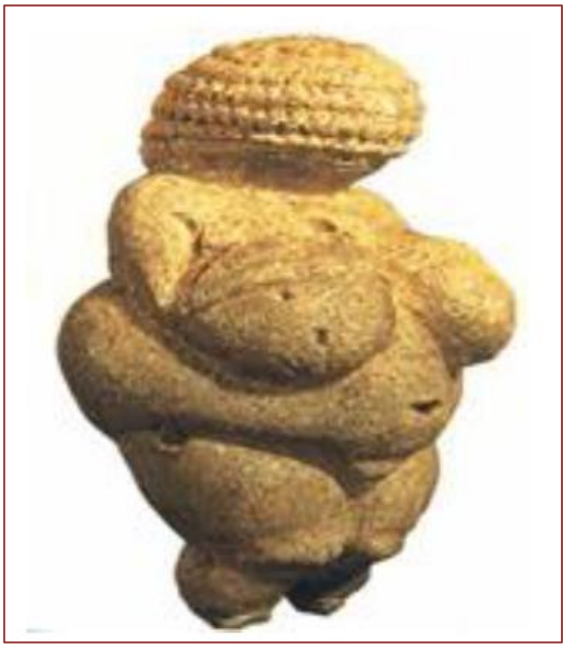


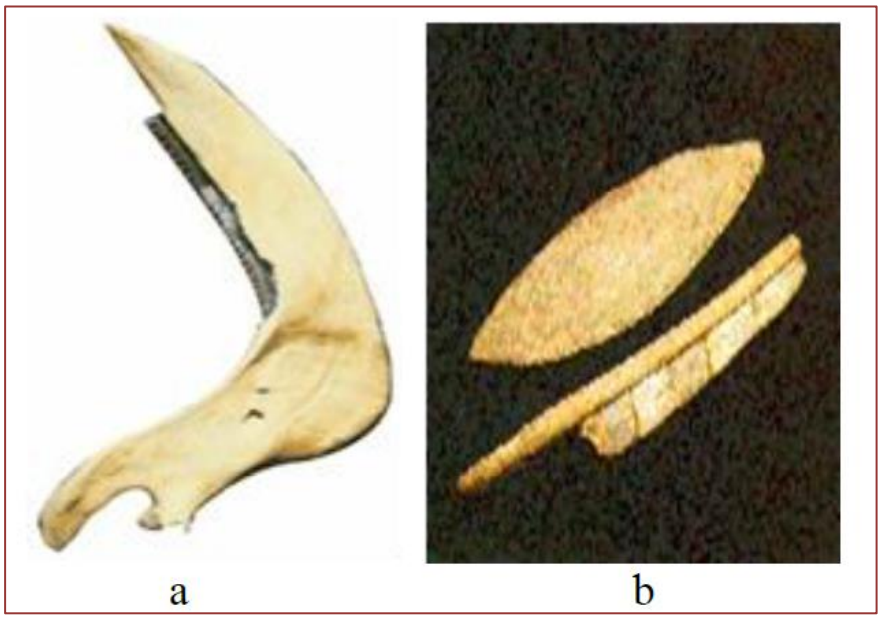
Figura 4. Vênus de Willendorf, escultura do período Paleolítico (NAVARRO, 2006).



O período Neolítico não foi caracterizado apenas pelo crescimento espetacular na manipulação técnica das matérias-primas que eram colocadas em sua superfície, mas também pelo plantio, notadamente, de plantas comestíveis, especialmente cereais. O tratamento térmico da época em lavas basálticas (CURRAN et al., 2001), que permitiu a produção de peças com supostas características, mostra que havia uma intenção de fazer essa mistura como forma de reforçar a argila. De acordo com Stevanovic (1997), seu polimento, bem como e principalmente pelo desenvolvimento da agricultura que se iniciou no período anterior, se deveu ao desenvolvimento da agricultura. De machados,

lanças, facas e pás primitivas, passaram a objetos polidos e com melhor acabamento, que permitiam o uso em maior escala de ossos e pedras como basalto e calcita na produção de artefatos domésticos e agrícolas, como mostrado na Figura 5. Considerados sedentários desde o final do Paleolítico porque não se moviam mais como antes, os hominídeos Neolíticos desenvolveram ainda mais essa tendência, tornando as práticas agrícolas decisivas para sua manutenção. Para essa prática, necessariamente, o solo tornou-se algo que não era apenas uma fonte de argila manipulada para os móveis e outras peças que representavam um status mais elevado ou imitavam formas humanas (ver Figura 4) (HAYDEN, 1993).

Figura 5. Artefatos de pedra polida: a) foice de osso e b) lâmina de faca de osso com base de pedra (NAVARRO, 2006).



4. A ERA DA ARGILA

O favorecimento da agricultura e do manejo do solo levou ao desenvolvimento de vasos cerâmicos necessários para o transporte e embalagem de alimentos e produtos agrícolas, bem como ao contato com outras matérias-primas como a porcelana Antrin, cuja fonte eram lateritas terciárias, um mineral bauxítico rico em ferro, derivado da ação de argilas com um grau surpreendente de sofisticação artística até hoje (ver Figura 6). A prática de construir casas durante o período Neolítico apresentou algumas inovações tecnológicas notáveis, principalmente no que diz respeito ao uso de materiais estruturais e suas combinações que não haviam sido utilizadas até então. Entre as inovações tecnológicas está a estratégia de construir casas utilizando argila reforçada com resíduos vegetais. Essas construções aparentemente rudimentares são superiores às atuais casas de taipa ainda populares no nordeste do Brasil. Dada a disponibilidade de terra, era fácil para os hominídeos Neolíticos construírem suas casas sobre fundações sólidas em rochas e longe da ação da água de rios e lagos. Algumas ferramentas e vasos foram provavelmente criados para trabalhos pesados no solo (escavações) e para transportá-lo e misturá-lo com água. Quanto à mistura de materiais para estruturar a argila, inicialmente pensou-se

ser uma mera coincidência, uma vez que os restos de vegetação poderiam vir com o solo extraído, mas a presença de palha e resíduos de cereais, às vezes cereais inteiros, não era o único motivo.

Figura 6. Fragmento de um artefato cerâmico do período Neolítico (NAVARRO, 2006).

"...Esses materiais de construção fazem parte da estratégia de construção do homem Neolítico. Esse grupo de materiais inclui madeira e restos de plantas encontrados no ambiente, como gramíneas encontradas em solos encharcados que podem ter sido acidental ou intencionalmente incorporadas à argila de construção, e materiais vegetais que foram cultivados pelo Homem, como o trigo. Esse último material é usado em seus resíduos como palha e casca ou mesmo o grão inteiro. A presença de partes de trigo na construção de residências é uma evidência muito significativa. O trigo foi inicialmente domesticado e produzido para fins alimentares,..." ao mesmo tempo, evidências mostram que partes do trigo não consumidas por hominídeos ou animais domésticos foram secundariamente utilizadas como material de reforço na construção de casas... em termos de engenharia, isso sugere que palha cortada, grama ou outros materiais vegetais foram incorporados à argila encharcada com o propósito de ligar, facilitar a secagem e distribuir melhor as rachaduras formadas. As razões para essa escolha, no entanto, levantam debates sobre se foram intencionais ou não..."

Além desse debate, descobertas arqueológicas em sítios no sudeste da Europa mostram que essas residências não apenas continham móveis, mas também acessórios imóveis, provavelmente camas. Além disso, também tinham pisos com uma camada espessa e compactada de argila e uma estrutura de madeira para o telhado, provavelmente feito de palha. A escolha deliberada de materiais específicos para cada uso e a mistura igual de materiais orgânicos e inorgânicos, como mostrado na Figura 7, atestam um alto nível de discernimento entre os hominídeos no final da Idade da Pedra, bem como caracterizam um alto nível de manufatura industrial e uma organização de trabalho complexa não vista anteriormente. Embora evidências de produção de

alimentos, vestuário e outras atividades da sociedade Neolítica não sejam encontradas, embora existissem, evidências para a produção de artefatos de argila, como vasos cerâmicos e outros artigos figurativos, em indústrias incipientes, a partir de argilas comuns ou porcelana independentemente em regiões onde estão localizados o atual Japão, Rússia, China e Irlanda, principalmente, e, ainda mais, da intensa construção de moradias, principalmente, na região dos Balcãs (ex-Iugoslávia) e a escolha da argila como a fonte predominante de matéria-prima para várias funções na sociedade Neolítica nos estágios finais desse período, levou alguns estudiosos a chamar o período entre 14.600 e 4.500 a.C. de Era da Argila (STEVANOVIC, 1997), de modo que a distribuição cronológica mostrada na Figura 2 deve ser modificada assumindo a configuração mostrada na Figura 8.

Figura 7. Estrutura e distribuição de materiais em uma casa Neolítica (NAVARRO, 2006).

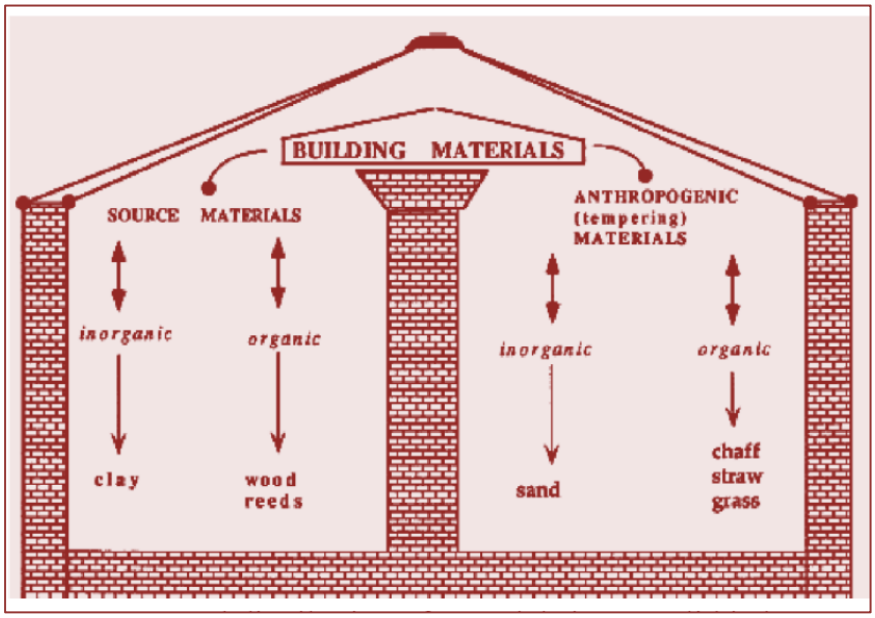


Figura 8. Distribuição cronológica incluindo a Era da Argila de acordo com Stevanovic (1997). (lA) Era da Argila; (IC) Idade do Cobre; (IB) Idade do Bronze; (IF) Idade do Ferro. Os números acima referem-se a anos a.C.

5. IDADE DOS METAIS

O verdadeiro início da Idade dos Metais e, por assim dizer, da metalurgia tem sido um assunto de controvérsia, o que parece ser comum na Arqueologia. Alguns autores, com base no método utilizado para definir o início da Idade da Pedra, definem o início da Era ou Idade dos Metais como o momento em que os artefatos de pedra começaram a se tornar escassos em sítios arqueológicos que datam do período que ainda poderia ser considerado Neolítico (ROSEN, 1984); outros, por outro lado, determinam o início dessa Era muito antes, com base na análise de marcas em ossos feitas por metais, que são substancialmente diferentes daquelas feitas por artefatos de pedra (GREENFELD, 1999). Este método ganhou importância, principalmente, após o trabalho pioneiro de Olsen (1988) que demonstrou que a lâmina de corte de um metal produz sulcos e cortes mais precisos em peças ósseas com padrões definidos e uniformes em contraste com os cortes irregulares, disformes com diferentes profundidades e cortes mais marcantes feitos por instrumentos de pedra. Este método define o início da Idade dos Metais por volta de 4.500/4.000 a.C.

5.1. PERÍODO CALCOLÍTICO E IDADES DO BRONZE

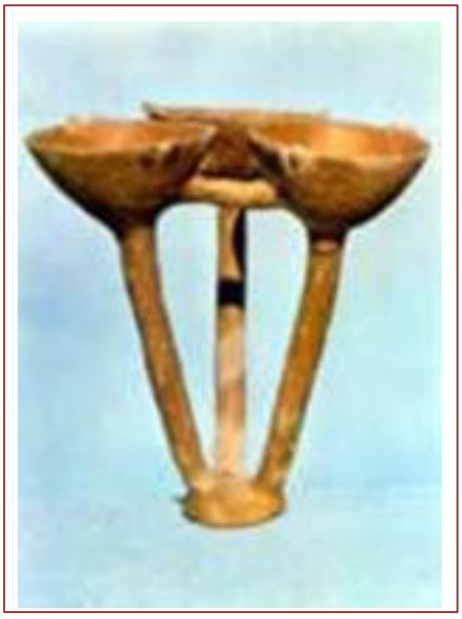
A definição do início da Idade dos Metais não encerra em si a discussão sobre a metalurgia incipiente. A própria distribuição das Idades da Humanidade, como mostrado na Figura 1, já é um grande avanço. O que hoje é considerado a Idade do Cobre, também chamado de Período Calcolítico, foi por muito tempo considerado como pertencente à Idade do Bronze.

Conforme definido pela metalurgia moderna, bronze é o nome genérico para ligas metálicas que contêm cobre (Cu) e estanho (Sn) como os principais componentes, geralmente na proporção de 90% Cu para 10% Sn. Achados do período inicial da chamada Idade do Bronze continham cobre e arsênio (As) como os principais componentes (ROSENFELD; ILANI; DVORACHEK, 1997).

Peças mais antigas continham tão pouco que esse componente era considerado uma mera impureza (KLEIN; HAUPTMANN, 1999). Assim, como os achados metálicos mais antigos contendo Cu e Sn datavam de um período posterior, a Idade do Bronze teve seu início movido de 4.500/4.000 a.C. para 3.300/3.150 a.C. (ROSENFELD; ILANI; DVORACHEK, 1997). Além do aspecto meramente constitucional, os artefatos dos períodos Calcolítico e dos estágios iniciais da Idade do Bronze são conceitualmente diferentes, como mostrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9. Artefato cerâmico Calcolítico contendo inclusões de cobre pertencentes à civilização da Anatólia (NAVARRO, 2006).

Figura 10. Vaso usado em rituais no início da Idade do Bronze (NAVARRO, 2006).



O período Calcolítico ainda tinha uma forte presença das características existentes no final do que é atualmente considerado a Era da Argila, agora com inclusões de cobre tanto no revestimento quanto em pequenos detalhes decorativos. A partir do que tem sido convencionalmente chamado de Idade do Bronze Média (2.400 a 2.100/1.900 a.C.), os artefatos de bronze assumiram aspectos mais elaborados (ver Figuras 11 e 12) e começaram a conter não apenas um teor de Sn mais elevado, mas também teores significativos de outros elementos de liga, especialmente chumbo (Pb) (KLEIN;

HAUPTMANN, 1999), além de outras impurezas como aquelas encontradas em peças originárias da antiga Canaã (Idade do Bronze Tardia, 2.100/1.900 a 1.200 a.C.), que compreendia um território que agora está localizado.

Figura 11. Artefato decorativo da Idade do Bronze Média encontrado em Israel, Síria e Líbano (ROSENFELD; ILANI; DVORACHEK, 1997).

Figura 12. Artefatos originários da Idade do Bronze Tardia (NAVARRO, 2006).

O período final da Idade do Bronze foi caracterizado não apenas por peças de alta liga e artefatos mais bem trabalhados, mas também pela crescente presença de artefatos feitos de outros metais, notavelmente a prata. A Figura 12 mostra peças usadas para guerra e caça, onde peças de bronze – mais escuras e amareladas – coexistem com outras feitas de metais mais claros, provavelmente ligas de prata.

5.2. IDADE DO FERRO

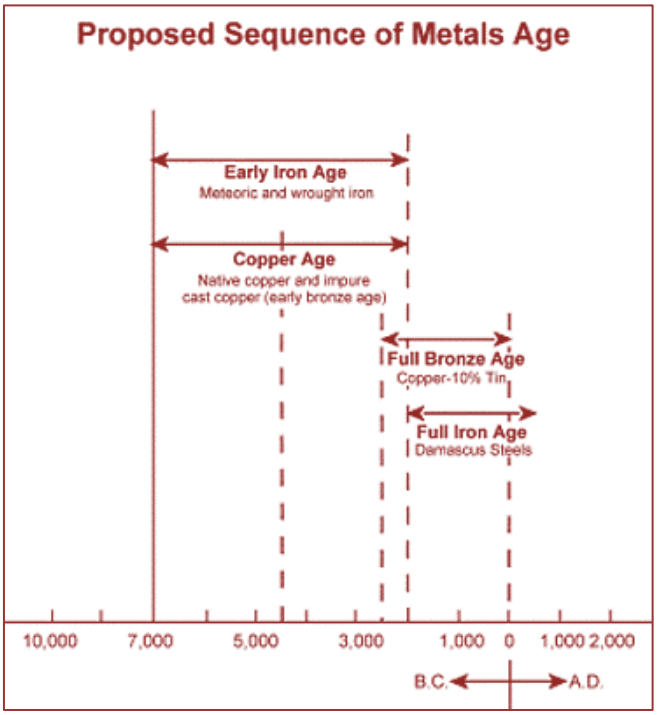
Convencionalmente, a Idade do Ferro é considerada como tendo começado no final da Idade do Bronze e continuado até o início do domínio da Civilização Romana (1.200 a 586 a.C.). Shearby e Wadsworth (2001) fizeram uma provocação, alertando que a manipulação intencional de componentes tão diversos como Cu, Sn e Pb era uma atividade muito mais complexa do que manipular o minério de ferro presente na crosta terrestre, tanto na forma de óxidos quanto em fragmentos de meteoritos que colidiam com o solo, bem como o arsenieto de cobre (CuAs), um mineral abundante no Período Calcolítico (KLEIN; HAUPTMANN, 1999; BRANIGAN, 1974). Baseados não apenas na questão subjetiva relacionada à facilidade ou dificuldade de manipular diferentes minérios para produzir ligas mais complexas do que simplesmente reduzir óxidos minerais, mas em evidências baseadas em descobertas arqueológicas irrefutáveis, Shearby e Wadsworth (2001) defendem mover o início da Idade do Ferro para 7.000 a.C., ou seja, juntamente com o início do Período Calcolítico, que também seria movido. Muito antes de Sherby e Wadsworth (2001), a literatura já produzia evidências para o deslocamento do início da Idade do Ferro. Waldbaum (1980) documentou a descoberta de peças de ferro, de diferentes locais, que datavam de um período anterior a 3.000 a.C., uma delas encontrada no território do atual Iraque datava de 5.000 a.C. Documentos como o livro de Agrícola, Da Re Metallica, mencionavam que o mais antigo artigo egípcio escrito já encontrado (3.500 a.C.) mencionava o ferro pelo nome. Após analisar uma peça de ferro encontrada dentro da pirâmide de Quéfren (3.700 a.C.), El Gayan e Jones (1989) afirmaram que: "…. a evidência metalúrgica apoia a evidência arqueológica que sugere que a placa foi incorporada à pirâmide na época em que sua estrutura estava sendo construída."

Apesar das evidências, a atual controvérsia em relação à verdadeira posição das Idades dos Metais reside na produção de bronze, que requer técnicas metalúrgicas complexas. O ferro, por outro lado, além de existir em minerais e fragmentos de meteoritos encontrados no solo, não requer técnicas elaboradas para ser transformado em artefatos. Para tanto, basta derretê-lo ou mesmo martelá-lo quando aquecido. Esta última operação, que é bastante simples, é suficiente para produzir peças com dureza e resistência duas vezes maiores do que a do cobre combinado com arsênio e equivalente aos bronzes de alta liga. Se tomarmos como base as técnicas ainda utilizadas pelos ferreiros hoje, o ferro trabalhado em temperaturas moderadas poderia ter sido perfeitamente manipulado em tempos tão distantes quanto o tempo do Homem de Neandertal (300.000 a 40.000 a.C.). Ventos fortes e carvão nos locais habitados por esses hominídeos foram suficientes para produzir temperaturas em torno de 1.200 °C, adequadas para a transformação de óxidos de ferro em artefatos primitivos. Sítios arqueológicos deste período na Espanha, onde existem grandes quantidades de minério de ferro, mostram sinais de terem sido intensamente explorados. O fato de essa tecnologia não ter progredido tem mais a ver com aspectos antropológicos do que técnicos: o Homem de Neandertal, que provavelmente dominava essa tecnologia, foi suplantado pelo Homem de Cro-Magnon, que era ao mesmo tempo mais corajoso e mais primitivo na técnica de

manipular matérias-primas para transformá-las em artefatos úteis (SHERBY; WADSWORTH, 2001).

Com base nisso e assumindo que 7.000 a.C. é quando a transição da Idade da Pedra para a Idade dos Metais realmente ocorreu, Sherby e Wadsworth (2001) propõem a seguinte distribuição cronológica para a Idade dos Metais, como mostrado na Figura 13.

Figura 13. Distribuição cronológica das eras metálicas após Sherby, O. D., e Wadsworth, J. (2001).



A maioria dos autores, no entanto, até o momento, permanece fiel à distribuição mostrada na Figura 8. Isso se deve em parte às poucas peças de ferro com datas arqueológicas mais antigas do que aquelas comumente encontradas em sítios considerados da Idade do Ferro. No entanto, ao contrário do cobre e suas ligas, os artefatos de ferro são drasticamente atacados pela corrosão, o que explica em parte a raridade de achados mais antigos. Além disso,[1] os achados datados da Idade do Ferro são mais ricos em peças de ouro, prata (Figura 14) e cerâmica (Figura 15) do que em ferro propriamente dito (Figura 16). Isso pode significar que o ferro, tendo sido usado em tempos anteriores, teria sido substituído por metais como ouro e prata e por ligas de ferro (Fe) e carbono (C) (aços). Essas ligas se destacariam da chamada Segunda Idade do Ferro (1.000 a 586 a.C.). Este período, especialmente em seu final, deu origem à fase de expansão territorial de impérios e à imposição cultural de várias civilizações sobre outras com menor poder econômico e/ou militar.

Figura 14. Joias encontradas em escavações realizadas em sítios arqueológicos da Idade do Ferro (NAVARRO, 2006).

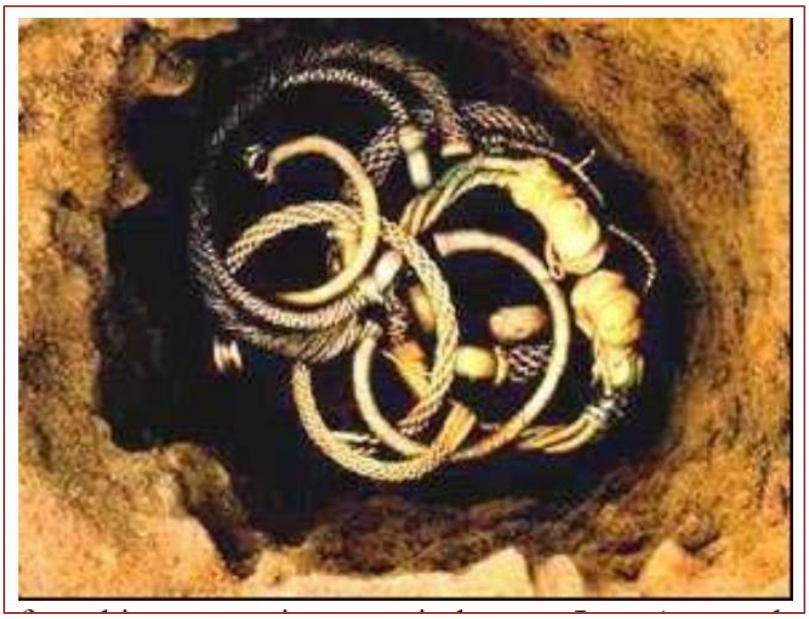


Figura 15. Vaso cerâmico celta da Idade do Ferro (NAVARRO, 2006).

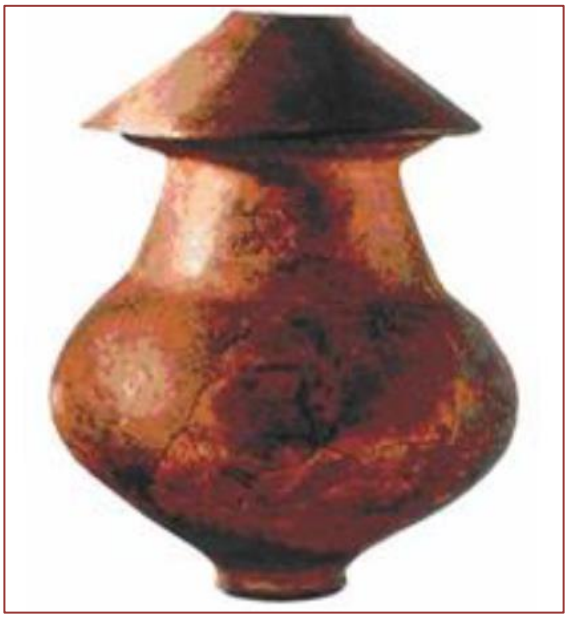


Figura 16. Artefatos decorativos e ferrame ntas de ferro da Idade do Ferro (NAVARRO, 2006).

5.3. DO FINAL DA IDADE DO FERRO AO INÍCIO DA ERA MODERNA: A ERA DO AÇO

O período entre o final da Idade do Ferro (586 a.C.) e o final do último período islâmico ou o início da Era Moderna (1918 d.C.) foi um período caracterizado, em sua maior parte, por um declínio no progresso tecnológico, especialmente no Ocidente. Em parte, isso se deveu ao obscurantismo causado pelo crescimento do pensamento e comportamento religioso. No entanto, as batalhas resultantes da expansão de povos impulsionada pela necessidade de impor seu poder, religião e cultura levaram à densidade populacional em lugares mais protegidos de ataques inimigos, o que levou as técnicas de construção de moradias a adotarem padrões que priorizavam a segurança; assim como o comércio e a busca por mercados alternativos levaram ao desenvolvimento de técnicas de navegação, da própria navegação e da construção de embarcações.

Nesse aspecto, destacaram-se a madeira, a pedra trabalhada para a construção de fortes, castelos e cidadelas (ver Figura 17) e ferramentas, máquinas e equipamentos e armas feitas de aço e ferro fundido. Esses novos materiais, ao contrário das antigas peças de ferro, eram feitos de ligas Fe-C, diferindo apenas no teor de carbono da liga. Quanto aos aços, parece que a nova tecnologia estava confinada ou se desenvolveu mais no Oriente do que no Ocidente. Isso se deve ao surgimento das famosas espadas de Damasco e Persas no final da Idade do Ferro, cuja técnica de produção ainda é assunto de discussão hoje devido ao refinamento artístico e técnico da produção e à excelente qualidade da matéria-prima utilizada. Com base em relatos históricos, arqueólogos e metalurgistas acreditam que as espadas orientais, Damasco, Persas e Japonesas, eram feitas da mesma matéria-prima utilizada pelos ferreiros Persas: o aço Wotz indiano da Índia. Essa matéria-prima foi amplamente utilizada mesmo durante a Idade Média, quando produziu na Rússia os famosos aços Bulat, que atingiram preços mais altos do que os do ouro (SHERBY; WADSWORTH, 2001).

As armas brancas orientais foram provavelmente o ponto de virada que permitiu aos Bizantinos e mais tarde aos Muçulmanos dominar o Ocidente de 324 a.C. a 1918 d.C. Na tentativa de recuperar o poder territorial sobre a Europa e permitir aos Ocidentais o livre acesso ao comércio no Mediterrâneo e aos lugares sagrados para os Cristãos no Oriente, os Cristãos Europeus empreenderam, nos séculos XII e XIII d.C., uma vasta campanha contra o mundo Muçulmano. Essas expedições militares, chamadas Cruzadas, terminaram em sua maioria em fracasso e na perda de muitos soldados pelos exércitos Cristãos que lutavam com espadas de bronze contra os Orientais com suas espadas de aço. Talvez seja daí que vem a famosa expressão: nenhum Cristão aguenta!

Os avanços científicos alcançados após o Renascimento (séculos XIV e XV d.C.), principalmente após o trabalho de Newton (final do século XVII e início do século XVIII d.C.) levaram à Revolução Industrial que começou em meados do século XVIII d.C., que libertou o pensamento científico de Deus e do pensamento religioso. Mas foi após a Revolução Industrial entre os séculos XVIII e XIX, com o surgimento da indústria moderna em grande escala, principalmente na Grã-Bretanha, que substituiu a oficina artesanal. Em um sentido mais amplo, a Revolução Industrial pode ser considerada como tendo começado no século XIII, quando as primeiras máquinas hidráulicas foram introduzidas na indústria têxtil. A partir desse ponto, a exploração industrial do carvão e do minério de ferro na fabricação de aço, sabão, açúcar, cerveja, pólvora, objetos de cobre, estanho, latão e papel favoreceu a introdução de novas indústrias e a aplicação de novos métodos às antigas indústrias, além da descoberta e aplicação de novas técnicas.

No entanto, foi no período considerado como aquele em que uma “revolução” realmente ocorreu, nos séculos XVIII e XIX, quando surgiram alguns novos desenvolvimentos na produção industrial, como a metalurgia do coque, o uso da máquina a vapor (ver Figura 18) na mineração e laminação, a invenção de máquinas nos setores de fiação e tecelagem, algumas das quais movidas a vapor, o uso de novos métodos e materiais em cerâmica, engenharia civil e transporte, especialmente canais e ferrovias. O mundo estava então preparado para o início da Era Moderna e com ela um crescimento sem precedentes no desenvolvimento e uso de novos materiais e na expansão das aplicações de materiais tradicionais sujeitos a modificações críticas em suas formulações e estruturas.

Figura 17. Edificações da Idade Média. a perda de vários soldados pelos exércitos Cristãos que lutavam com espadas de bronze contra os tradicionais submetidos a modificações críticas em suas Os Orientais com suas espadas de aço. Talvez seja daí que vem a famosa expressão: nenhum Cristão aguenta! (NAVARRO, 2006).

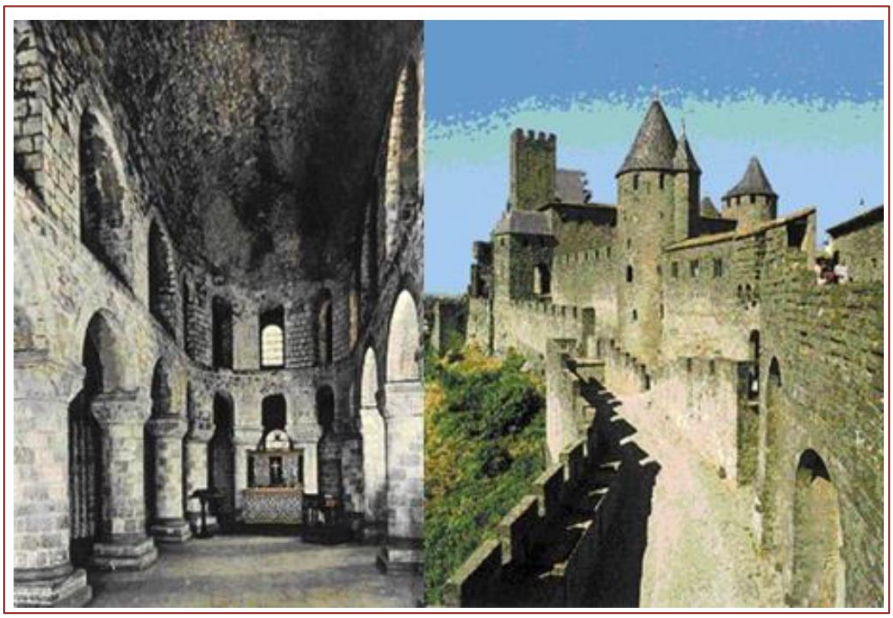


Figura 18. Veículo a vapor da época da Revolução Industrial (NAVARRO, 2006).

6. ERA MODERNA

Vários povos habitaram o continente americano por milhares e até milhões de anos antes de Cristóvão Colombo chegar à ilha onde hoje se encontra a República Dominicana. Apesar da importante contribuição de cada um deles para a História do Homem nas Américas e para toda a civilização, no campo da Ciência e Engenharia de Materiais, bem

como em outros aspectos, as civilizações Inca, Asteca e Maia foram de longe as mais importantes e as que deixaram um legado difícil de mensurar. Nas seções subsequentes, serão apresentadas algumas das razões para as afirmações feitas até agora.

6.1. CIVILIZAÇÃO INCA

O Império Inca (Tawantinsuyu em Quechua) foi um estado-nação que existiu na América do Sul de cerca de 1200 até a invasão dos conquistadores espanhóis e a execução do Imperador Atahualpa em 1533. O império, tão vasto quanto o Romano (ver Figura 19), incluía regiões que iam do extremo norte, abrangendo o atual Equador e o sul da Colômbia, todo o Peru e Bolívia, até o noroeste da Argentina e o norte do Chile. A capital do império era a atual cidade de Cuzco (em Quechua, "Umbigo do Mundo"). O império englobava várias nações e mais de 700 línguas diferentes, sendo o Quechua a mais falada (BAUER, 1992; BAUER, 1998).

Grandes ou pequenas, a estrutura típica Inca era um edifício retangular com um único cômodo. Geralmente havia uma porta no meio de uma parede grande. Quando o cômodo era muito comprido, às vezes usavam mais de uma porta. A maioria dessas estruturas tinha um único andar. Havia algumas exceções, por exemplo, se a estrutura fosse construída em uma colina, um segundo andar poderia ser adicionado para que tivessem uma maneira de acessar o andar superior mais facilmente. Os telhados dos edifícios Incas eram cobertos com palha (COBO, 1979). Em áreas montanhosas, os telhados tinham uma inclinação mais acentuada para permitir que a água da chuva escorresse. Os Incas ocasionalmente usavam outras formas geométricas, assim como os Astecas. Edifícios circulares e em forma de U eram construídos, mas, como com os Astecas, essas formas não eram amplamente utilizadas.

Figura 19. Extensão territorial do Império Inca (NAVARRO, 2008).

Qualquer que fosse o tipo de edifício, os Incas usavam diferentes tipos de pedra em seus projetos de construção. Pedras grosseiramente acabadas eram usadas para construir paredes, colocadas lado a lado conforme a geometria permitia, usando barro ou argila como argamassa. Após rebocar as paredes, os Incas as pintavam para melhorar sua aparência. Por outro lado, para edifícios mais importantes, as pedras eram cuidadosamente moldadas e colocadas precisamente umas ao lado das outras. Para este último tipo de trabalho, eram utilizadas ferramentas feitas de pedras muito duras e cinzéis de bronze (COBO, 1990). Para qualquer tipo de edifício, quando necessário, eram usados para levantar pedras maiores e mais pesadas. Ao contrário dos Maias, os Incas não usavam toras para rolar suas grandes pedras nem usavam fios de prumo para construir seus edifícios. A única coisa que eles têm em comum é o fato de que nenhum instrumento à base de ferro, réguas ou esquadros eram usados.

Os Incas produziam artefatos destinados ao uso diário, decorados com imagens e detalhes de deuses. O uso de formas geométricas abstratas e representações de animais altamente estilizadas em cerâmicas, esculturas de madeira, tecidos e objetos de metal era comum na cultura Inca. Eles produziam belos objetos de ouro, sendo as mulheres responsáveis pela produção de tecidos finos, alguns com desenhos surpreendentes (MALPASS, 1996). No auge da civilização Inca, por volta de 1400, a agricultura organizada se espalhou por todo o império, da Colômbia ao Chile, com o cultivo de cerca de setecentas espécies de plantas, entre elas o algodão. O plantio era feito em terraços e eles já utilizavam a avançada técnica de curvas de nível, sendo os primeiros a utilizar o sistema de irrigação (COBO, 1979). Arar a terra era feito com a ajuda de varas afiadas e arados feitos de material não ferroso. Embora a lhama fosse usada para transportar as colheitas, era a principal fonte de couro e, principalmente, de lã para fazer tecidos, mantas e cordas.

Os Incas gostavam de se adornar e vestir bem. Quanto mais ricos em detalhes e elaborados os tecidos, mais caros e dispendiosos eles eram, demonstrando em última análise o nível social de quem os vestia. Os Incas, que usavam gorros de lã com cores para designar a origem de quem os vestia, mostraram que tinham conhecimento da técnica de tingimento, provavelmente através do uso de corantes minerais. Os homens dessa civilização usavam muito mais joias do que as mulheres; os mais ricos usavam braceletes feitos de ouro e a famosa prata de Potosi (ver o tópico a seguir) e enormes brincos – quanto maior o brinco, mais importante a pessoa que o usava (MALPASS, 1996).

6.2. AS PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES INCAS NO CAMPO DOS MATERIAIS

Pontes de Corda

A cultura Inca era baseada no adorno e no uso de vestuário. Para isso, havia um grande domínio da técnica de produção e uso de fibras vegetais, que resultou na construção das incríveis pontes Incas (ver Figura 20), e na mineração e processamento de minerais preciosos, especialmente a prata de Potosi.

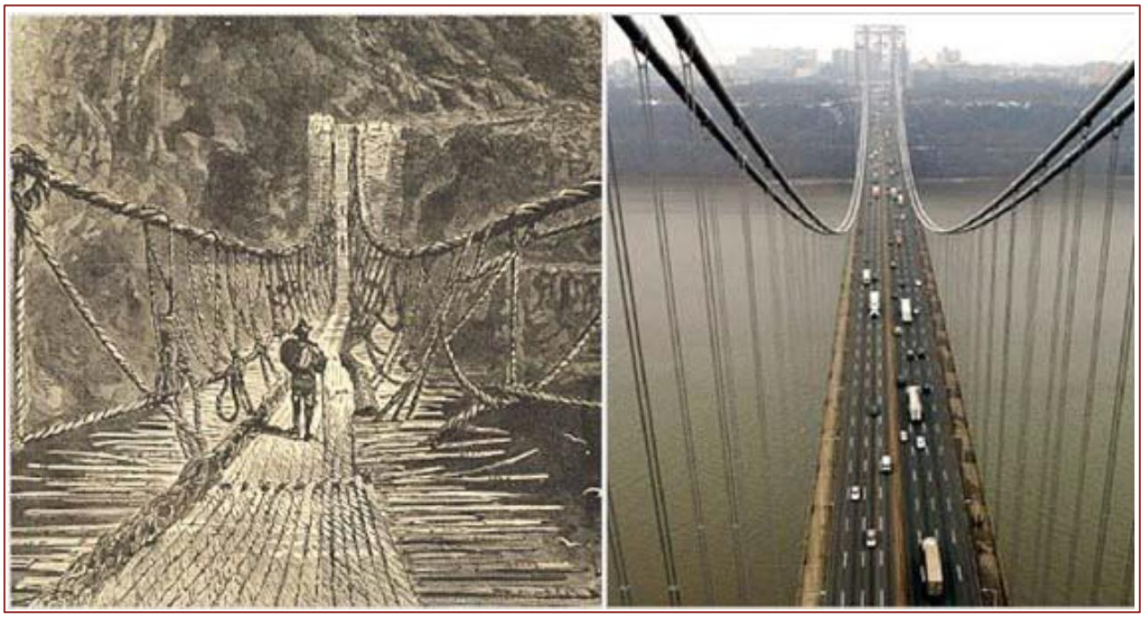
Figura 20. Ponte Inca, conectando os dois lados de um penhasco (NAVARRO, 2008).

Os conquistadores espanhóis vieram, viram e voltaram maravilhados. Eles nunca tinham visto nada na Europa como as pontes do Peru. Cronistas escreveram que os soldados espanhóis desconfiavam de caminhar sobre as pontes de cabos de fibras tecidas suspensas sobre desfiladeiros profundos nos Andes porque elas balançavam e oscilavam como passarelas frágeis (D'ALTROY, 1999). Pelo contrário, as pontes suspensas foram vitais para estabelecer o vasto império Inca nos Andes por centenas de anos antes da chegada do conquistador espanhol em 1532. O povo, que não havia desenvolvido o arco de pedra ou o transporte com rodas, tornou-se fantasticamente habilidoso no uso de fibras naturais para fazer tecidos, barcos e armas de arremesso, e até mantinha um inventário através de um sistema de pré-escrita baseado em nós. Essas pontes feitas de cordas de fibra, algumas tão grossas quanto o tronco de um homem (ver Figura 21), eram a solução tecnológica para o problema de atravessar terrenos acidentados e vales profundos.

Figura 21. Ponte ao estilo Inca, mostrando detalhes da espessura dos cabos (NAVARRO, 2008).

De acordo com algumas estimativas, pelo menos 200 dessas pontes foram construídas sobre desfiladeiros de rios antes do século XVI. Tal tecnologia complexa inspirou a construção de pontes modernas, como mostrado na Figura 22, onde uma ponte Inca e uma ponte moderna da Califórnia estão lado a lado.

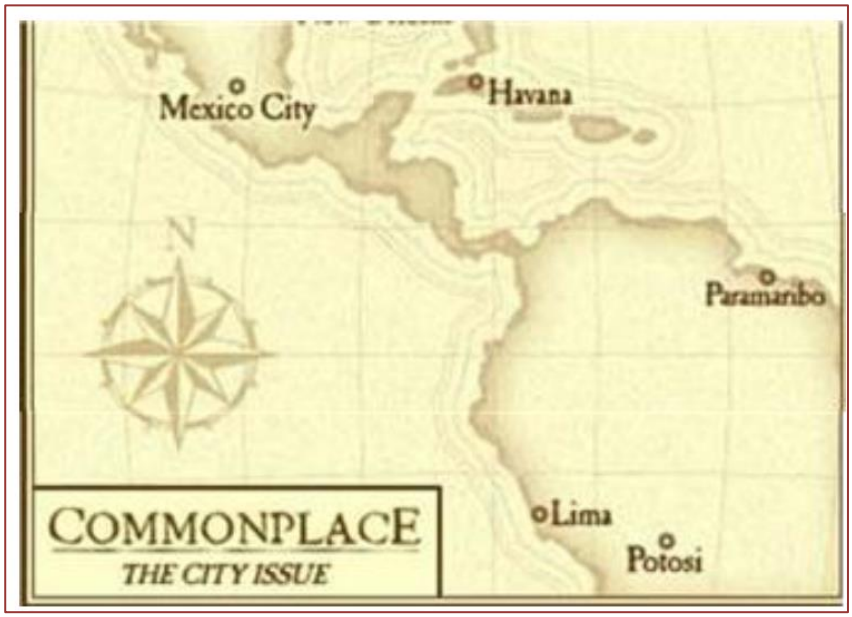
Figura 22. Ponte Inca ao lado de uma ponte atual na Califórnia (NAVARRO, 2008).



Prata de Potosi

Os Incas são talvez mais conhecidos por sua extensa mineração da famosa prata de Potosi. A lenda diz que, no século XV, o governante Inca descobriu os vastos depósitos de prata em Cerro Rico de Potosi, no sudeste da atual Bolívia (ver Figura 23) (HANKE, 1956).

Figura 23. Localização da região de Potosi (NAVARRO, 2008).



Inicialmente, os povos nativos mineravam prata esporadicamente. A partir da década de 1540, à medida que os colonos espanhóis se expandiram para o sul para conquistar o império Inca, tudo sobre Potosi mudou. Uma afloração de trezentos pés de minério de prata na encosta ocidental da montanha indicava a riqueza que jazia abaixo; por volta de 1545, mineradores espanhóis e alguns índios começaram a minerar (LOPEZ-MORILLAS, 1975). A partir de então, por cerca de meio século, houve uma extraordinária expansão da atividade de mineração em torno do Cerro Rico (morro rico). Em 1547, a população de Potosi era de aproximadamente 14.000; em 1571, 40.000. Em 1600, a população havia atingido 150.000. Isso elevou Potosi a um nível demográfico comparável ao das principais capitais da Europa e da Ásia (Londres, Amsterdã, Cantão, Tóquio), transformando-a na maior comunidade humana do Hemisfério Ocidental, com uma composição populacional nunca antes vista.

Uma estimativa de 1611 indicava a existência de 3.000 espanhóis, 40.000 europeus não espanhóis (franceses, alemães, italianos, portugueses, ingleses, entre outros), 35.000 crioulos (americanos, muitos[1] de ascendência variada), 76.000 índios (eles próprios representando inúmeras e diferentes origens étnicas e culturais) e 6.000 africanos (quase todos mantidos como escravos por residentes brancos de Potosi) (HANKE, 1956). Inicialmente, por pelo menos vinte e cinco anos, os índios mostraram que dominavam totalmente a tecnologia aplicada à exploração da prata. A prática tradicional de fundição Inca produzia uma separação mais eficaz da prata do resíduo do que a praticada pelos refinadores europeus, produzindo artefatos de extrema perfeição (ver Figura 24).

Figura 24. Amostras de peças fundidas em prata de Potosi (NAVARRO, 2008).

De acordo com relatos dos colonos, quinze mil fornos de vento Incas, quando em plena operação, brilhavam como estrelas todas as noites nas encostas de Potosi. Mas por volta de 1570, a tecnologia, a economia e o sistema de trabalho foram abruptamente transformados. Foi então que uma nova técnica de refino,[2] baseada na interação química do minério de prata com o mercúrio, chegou a Potosi. Isso, juntamente com a descoberta simultânea de grandes depósitos de mercúrio não muito a oeste, logo tornou obsoletos os fornos de vento nativos. No entanto, também houve ordens diretas do rei para reorganizar a indústria como um todo. Inicialmente, a prata de Potosi estava sujeita ao imposto do "quinto real", tornando-se o esteio das finanças públicas, representando em alguns anos aproximadamente 25% da receita da Coroa. Por muitos anos, até a década de 1820, quando ocorreram as ações libertadoras de Simon Bolivar, Potosi foi vítima de exploração irracional e os nativos, submetidos a trabalho escravo, foram quase dizimados. Bakewell (1984), em uma pergunta e resposta, escreveu o seguinte: O que, então, era esta Potosi? Nada menos que um lugar que redirecionou (e cruelmente encurtou) inúmeras vidas, reorganizou (ou destruiu) culturas inteiras, financiou um vasto império, transformou economias, energizou a América e mudou o mundo.

6.3. A CIVILIZAÇÃO MAIA

A civilização Maia, provavelmente a mais conhecida civilização clássica pré-colombiana, destacou-se na região de Yucatán da América Central por volta de 250 a.C. Na área que abrangia, que inclui regiões que hoje são o sul do México e os atuais territórios da Guatemala, Belize e Honduras (ver Figura 25), ainda existem evidências dessa grande civilização, notadamente as pirâmides que se destacam em meio à densa floresta.

Figura 25. Detalhe do território, destacando os sítios arqueológicos mais importantes da civilização Maia (GUIRAO, 1983).

Aspectos Gerais e Materiais Usados no Cotidiano

Apesar de suas grandes obras e cidades maravilhosas, os Maias tiveram uma grande influência no mundo moderno devido às suas conquistas intelectuais. Sua matemática avançada permitiu que eles rastreassem os planetas, previssem eclipses e produzissem um calendário preciso. Além disso, os Maias desenvolveram uma linguagem baseada na escrita hieroglífica. Eles também eram conhecidos por seu trabalho artístico, com murais, estátuas e cerâmica elaboradamente decorados. As cores utilizadas eram possivelmente as mais espetaculares daquele período e eram obtidas de materiais como óxidos de ferro e manganês e carvão. Os ingredientes eram misturados com agentes específicos, dependendo da aplicação, o que exigia um conhecimento de técnicas do que hoje chamamos de química. Mais adiante, nos concentraremos no incrível azul Maia.

Os materiais utilizados nas construções eram geralmente pedras encontradas nos arredores da cidade. Destas, a mais comumente utilizada era o calcário, abundante na maior parte do território Maia. Em geral, as pedreiras estavam localizadas fora da cidade, perto dos locais onde os blocos podiam ser removidos para serem trabalhados, para produzir os blocos menores, geralmente lajes planas, utilizadas na construção (BENSON, 1967).

Os Maias também usavam argamassas em seus edifícios. Essas argamassas eram obtidas pela queima de calcário, em um processo muito técnico. Esse processo consistia em justapor camadas de calcário e madeira, em toras ou cavidades, que eram então queimadas, produzindo a argamassa. Para os Maias, a aparência externa de seus edifícios era muito mais importante do que o interior. Os templos tinham telhados muito elaborados (STIERLIN, 1964), com argamassa também sendo usada para refinar o acabamento do exterior dos edifícios, para cobrir os pisos e para fazer esculturas. A argamassa foi de grande ajuda na preservação dos produtos Maias, embora, em áreas mais úmidas, o estuque se deteriorasse prematuramente (BENSON, 1967).

Dadas as características climáticas, os Maias tiveram que desenvolver uma técnica peculiar de tecelagem. Antes da conquista pelos espanhóis, o algodão era usado exclusivamente pela elite da sociedade Maia. Consequentemente,[3] a maioria da população teve que explorar outras fibras vegetais para criar artigos de vestuário. As fibras vegetais tradicionais mais importantes utilizadas[4] na criação de tecidos são as da espécie Agave - há evidências do uso de agave para bordados em fragmentos de tecido do Cenote do Sacrifício em Chichen Itza. Atualmente conhecida como Ixtle, esta fibra é usada principalmente para a produção de cordas, embora também seja usada para redes e sandálias. De fato, antes da invenção das fibras sintéticas, a maioria das cordas de barcos do mundo era feita de Ixtle. Duas espécies de agave, sisal e pita, eram usadas em diferentes regiões. Em Yucatán, as folhas de agave eram aquecidas sobre fogueiras, a polpa era então rasgada, lavada e seca, e usada para fazer fios.

O malacatl é usado para fiar algodão e lã. O fuso é uma vara de madeira fina, pontiaguda em ambas as extremidades com um anel de pedra na extremidade inferior. A extremidade pesada do fuso é colocada em uma cabaça seca para mantê-lo no lugar. A mulher segura a fibra em uma mão e usa a outra para girar o fuso. O fio é gradualmente enrolado no fuso. Um método mais rápido usando duas rodas de madeira ou bicicleta também é usado para fiar o fio.

Ainda sobre ferramentas, os antigos Maias não usavam ferramentas de metal, porque esses materiais normalmente não ocorriam na área onde seus territórios se estendiam. Assim, as ferramentas com as quais trabalhavam eram bastante simples, como fogo e machados de basalto sobre madeira. Como o fogo era muito imprevisível, eles preferiam machados de basalto, buscando um pouco mais de precisão. Ao trabalhar com pedra, eles usavam ferramentas feitas de sílex, obsidiana, granito, calcário e quartzito, também usavam a tecnologia de "prumo" para medir a precisão do alinhamento vertical (STIERLIN, 1964).

O Pigmento Azul Maia

O uso primário de fibras vegetais e seus processos de fiação e tecelagem, embora importantes, não foram tão importantes quanto uma contribuição para a evolução dos materiais, como o famoso Azul Maia, cujo principal segredo foi revelado em um trabalho publicado no final do século XX por Pollet et al [28]. Apesar da abundância de cores presentes em murais e outros objetos encontrados em sítios antigos, um tom peculiar de azul chamou a atenção dos pesquisadores. Essa cor azul, semelhante à do Mar do Caribe, passou a ser conhecida como "Azul Maia". No entanto, o pigmento é encontrado não apenas em pinturas murais e cerâmicas de sítios Maias, mas também em muitos outros locais da América Central. Assim, existem questões não respondidas sobre se os Maias transferiram a tecnologia para outras culturas ou se outras culturas descobriram essa tecnologia independentemente.

O pigmento não é um mineral de cobre e não está relacionado à terra ultramarina natural ou ao lápis-lazúli ou lazurita como originalmente se pensava Pollet et al. (2000). O Azul Maia é composto de paligorsquita e um pigmento orgânico natural (índigo), e possui estabilidade sem precedentes quando exposto a ácidos, álcalis e solventes, e resiste à biodegradação. Embora a técnica exata que os Maias empregavam para sintetizar um corante tão sofisticado permaneça um enigma, é possível realizar um método semelhante em laboratório. No entanto, a razão pela qual o complexo argila/índigo conferia ao material a estabilidade que se mostrava ter ainda era desconhecida, o que foi revelado por (POLLET et al., 2000).

Os resultados produzidos por métodos computacionais e investigações estruturais usando difração de raios X de uma fonte de síncrotron forneceram a primeira evidência da presença de índigo nos canais de paligorsquita, especialmente as ligações químicas que mantinham as moléculas unidas por séculos. A análise dos dados do síncrotron também permitiu elucidar a origem do material inicial usado pelos Maias e, além disso, entender como ocorreu a transferência de tecnologia. A estrutura refinada da paligorsquita encontrada em fragmentos de murais em vários sítios Maias permitiu a determinação da origem da fonte de cada um deles na produção do azul Maia, considerando que argilas de diferentes regiões podem conter diferentes impurezas e podem ter estruturas variadas. Como exemplo, há o caso de uma amostra de paligorsquita (chamada saklum na língua Maia), originária da península de Yucatán, que apenas indica a presença de dolomita como impureza; enquanto a amostra encontrada na região Totonaca apresenta calcita muito mais do que dolomita como impureza.

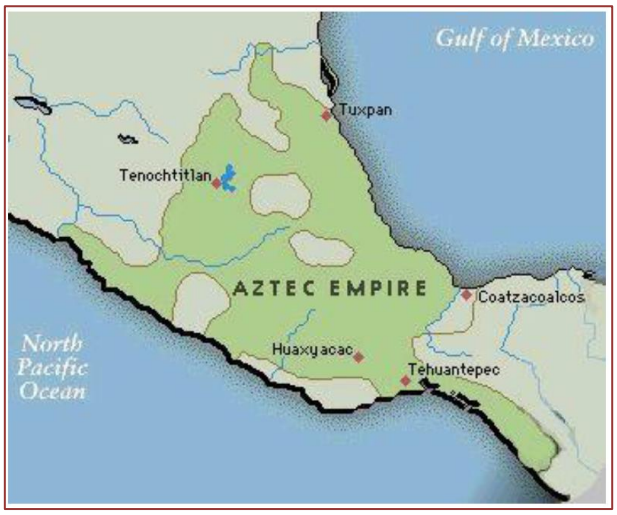
Pode-se concluir que, como as argilas são diferentes, não havia[1] comércio de argila, mas havia uma transferência do segredo da produção do azul Maia. Mesmo naquela época, havia uma clara intenção de disseminar a tecnologia como forma de promover e progredir a comunidade. Mas a contribuição mais importante é o fato de que o azul Maia é um material cuja estabilidade sem precedentes é alcançada sem a presença de metais pesados. Isso é de extrema importância para a indústria de tintas e pigmentos, que consome anualmente grandes quantidades de metais estrategicamente importantes e ambientalmente degradantes. Substituir esses pigmentos metálico-ferrosos por outros como o azul Maia certamente melhoraria muito a atual situação ambiental e resultaria em considerável economia de metais estratégicos.

6.4. CIVILIZAÇÃO ASTECA

Aspectos Gerais e Materiais Usados no Cotidiano

O povo Asteca, ou Mexica, vagou por cerca de 200 anos pela América Central até escolher o local sagrado onde, como previsto pelos sacerdotes, seria construída a capital de seu fantástico império. Uma pequena ilha no interior do Lago Texcoco foi escolhida para a construção de Tenochtitlan, sobre cujas ruínas foi construída a Cidade do México, a atual capital do país. Antes da capital, floresceu a cidade de Teotihuacán, que em seu auge, entre 450 e 650 d.C., constituiu a maior concentração humana na América Central pré-colombiana, com cerca de 100 mil habitantes distribuídos em seus quase 23 km^2 de área (STIERLIN, 2007). Mas foi desde a fundação da capital, em 1325, até sua destruição pelos invasores espanhóis em 1521, que o império Asteca floresceu, atingindo um vasto território como mostrado na Figura 26, baseado na construção de cidades com uma organização impressionante, com amplas ruas centrais das quais as ruas secundárias se originavam em ramificações retangulares (ACOSTA, 2007).

Figura 26. Extensão do império Asteca em seu auge em 1519 (GUIRAO, 1983).



A admirável organização urbana contrastava com uma notável falta de conhecimento em outras áreas. As avenidas retilíneas e largas não eram adequadas para nenhum veículo, já que os Astecas não conheciam a roda. As pirâmides monumentais, como a pirâmide do sol, com 65 m de altura e 225 m de cada lado (ver Figura 27), eram feitas de pedras de lava (tzetontle) e construídas em degraus. Esta era a forma inventiva que os Astecas encontraram para dispor as pedras, já que não tinham o conhecimento para desenvolver argamassa. No entanto, todos os edifícios eram cobertos com uma camada de barro, sobre a qual era colocada uma camada de gesso endurecido com resina vegetal (estuque), o que dava aos edifícios cores vivas – vermelho, branco ou azul – (ACOSTA, 2007).

Figura 27. Amostra de vários edifícios Astecas em Teotihuacán, destacando a Pirâmide do Sol e a longa, larga e reta avenida central, com 40 m de largura, estendendo-se por cerca de 2.200 m (NAVARRO, 2008).

O grande orgulho do povo e dos líderes Astecas era seu comércio interno, que o Imperador Montezuma chamou de maravilha do império (ACOSTA, 2007; BAUER, 1992). De acordo com Stierlin (1978), os Astecas não conheciam metal, pelo menos não em termos de seu uso como material estrutural ou ferramenta – o tardio aparecimento de cobre e ouro era destinado apenas ao uso como joias e objetos de culto. Os Astecas preferiam pedras verdes – turquesa e jade – ao ouro ao fazer objetos decorativos e joias (ver Figura 28). De acordo com Marcilly (1978), os Astecas não tecnicamente ultrapassaram a Idade da Pedra, já que o ferro era desconhecido para eles. Tanto que, para explodir rochas, eles inseriam cunhas de madeira em rachaduras, depois as molhavam para que, à medida que a madeira inchasse, rachaduras maiores fossem criadas. Os outros instrumentos eram feitos de pedra, cuja dureza estava de acordo com seu propósito: martelos de basalto (uma rocha vulcânica vítrea), picaretas de diorito (uma rocha com textura granular) e cinzéis de obsidiana. Em seus grandes mercados, utensílios de sílex e obsidiana se destacavam – como se ainda estivessem na Idade da Pedra, ao lado de outros feitos com as maravilhosas cerâmicas policromadas, usadas em dias de festa (ver Figura 29) (ACOSTA, 2007).

Figura 28. Máscara de homem feita de jade (NAVARRO, 2008).

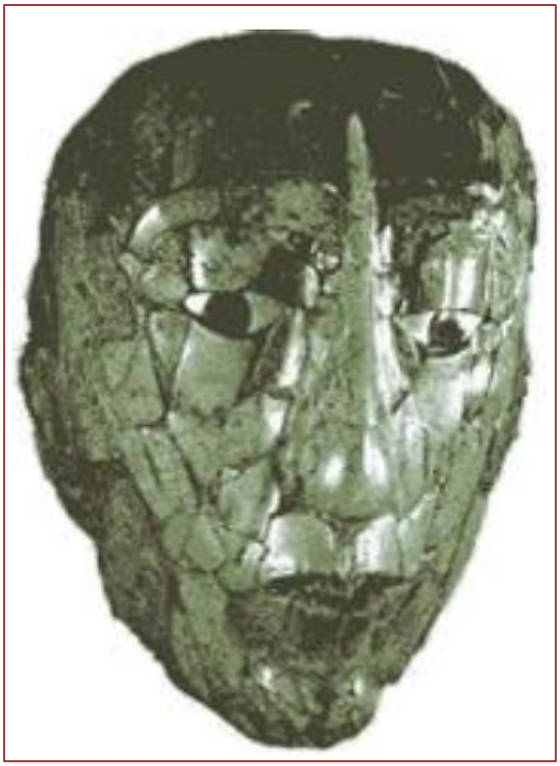


Figura 29. Peça artística feita de cerâmica em várias cores (NAVARRO, 2008)

Borracha

Inegavelmente criativos, os Astecas foram responsáveis pela criação ou descoberta de muitos tesouros, todos originários[1] de plantas ou práticas agrícolas. Das iguarias do milho ao chocolate, que vem dos grãos de cacau, podemos chegar à goma do tzictl e ao látex da seringueira. Assim como foram capazes de observar o quão agradável era mascar chiclete e como ele branqueava os dentes, eles também foram capazes de reduzir o leite da seringueira e transformá-lo em látex endurecido (MARCILLY, 1978).

A borracha, que logo foi usada para fazer bolas para o jogo de tênis Asteca, para muitos o predecessor do futebol de hoje, era um monopólio industrial e comercial dos pochteca, comerciantes que eram em grande parte responsáveis pela força do império Asteca. Embora as notáveis propriedades da seringueira fossem conhecidas pelos Astecas e provavelmente por outros povos americanos, a borracha só foi conhecida na Europa após a descoberta do chamado Novo Mundo. Pietro Martire d'Anghiera, capelão da corte de Fernando de Aragão, Castela e Leão, fez o primeiro registro escrito da goma de borracha em seu livro De Orbo Novo (MACNUTT, 2004). Nele, ele descreveu um jogo jogado por crianças Astecas usando bolas de borracha, destacando a surpreendente capacidade das bolas de saltar no ar depois de serem arremessadas contra o chão. Figura 28. Máscara de homem feita de jade.

Em 1615, aproximadamente 100 anos depois, outro espanhol, Juan de Torquemada, em seu livro Monarquía Indiana (TORQUEMADA, 1975), descreveu como os Astecas faziam incisões no caule da seringueira e extraíam o leite ou seiva que escorria. Quando seco, esse leite de borracha também era usado para fazer garrafas e solas de sapatos, em um processo que demonstrava um conhecimento técnico superior ao de nossos atuais seringueiros, cuja principal atividade é produzir enormes cilindros de borracha defumada para processamento futuro.

7. CONCLUSÃO

A jornada através da evolução dos materiais, desde a pré-história até as civilizações pré-colombianas, revela uma narrativa intrinsecamente ligada à própria história da humanidade. A busca por sobrevivência e a adaptação a diferentes ambientes impulsionaram a criação de ferramentas e técnicas cada vez mais sofisticadas, que, por sua vez, transformaram a forma como os grupos humanos interagiam com o mundo ao seu redor. A Idade da Pedra, com suas divisões em Paleolítico e Neolítico, ilustra essa progressão, desde o lascamento rudimentar da pedra para caça até o desenvolvimento de ferramentas polidas e o uso da argila para construção e armazenamento. Essa evolução não foi apenas tecnológica; ela moldou a transição de modos de vida nômades para sedentários, com o surgimento da agricultura e dos primeiros assentamentos, demonstrando como a disponibilidade e o domínio de materiais específicos influenciaram as estruturas sociais e econômicas.

A Idade dos Metais marcou um salto qualitativo, com a descoberta e domínio da metalurgia. A capacidade de fundir e moldar metais como cobre, bronze e ferro permitiu a criação de armas mais eficazes, ferramentas mais duráveis e objetos de adorno que refletiam o status social. As controvérsias em torno da datação precisa do início da Idade do Ferro revelam a complexidade da pesquisa arqueológica e a necessidade de considerar tanto as evidências materiais quanto as técnicas de produção. O domínio dos metais não foi apenas uma questão de avanço técnico; ele teve profundas implicações na organização social, na economia e nos conflitos entre os grupos humanos, alterando as relações de poder e as estratégias de guerra.

As civilizações pré-colombianas, como os Incas, Maias e Astecas, oferecem exemplos notáveis da capacidade humana de inovar e adaptar-se a seus ambientes. Os Incas, com suas pontes de corda e a exploração da prata, demonstraram um domínio impressionante das fibras vegetais e da metalurgia, criando soluções para desafios geográficos e desenvolvendo uma complexa rede de comunicação. Os Maias, com seu conhecimento avançado de química para a criação do Azul Maia e seu uso sofisticado de materiais de construção, legaram um patrimônio intelectual e artístico que continua a inspirar, evidenciando um conhecimento profundo dos recursos naturais e de suas propriedades. Os Astecas, embora com limitações em relação à metalurgia, desenvolveram tecnologias como a produção de borracha, que tiveram um impacto significativo em suas práticas culturais e comerciais. Em última análise, o estudo da evolução dos materiais nos permite apreciar a engenhosidade humana ao longo do tempo e a importância fundamental dos materiais no desenvolvimento das sociedades, destacando como a busca por materiais e o desenvolvimento de técnicas para utilizá-los foram motores essenciais da mudança histórica.

REFERÊNCIAS

[1] ACOSTA, R. A Vida na Monumental Tenochtitlán. História Viva, São Paulo, n. 45, p. 58-65, jun. 2007.

[2] BAKEWELL, P. Miners of the Red Mountain: Indian Labor in Potosi. Albuquerque: University of New Mexico Press, 1984.

[3] BAUER, B. S. The Development of the Inca. Austin: University of Texas Press, 1992.

[4] BAUER, B. S. The Sacred Landscapes of the Inca: The Cusco Ceque System. Austin: University of Texas Press, 1998.

[5] BENSON, E. P. The Maya World. New York: Grosset & Dunlap, 1967.

[6] BRANIGAN, K. Aegean metalwork of the early and middle bronze age. Oxford: Claredon Press, 1974.

[7] COBO, B. History of the Inca Empire. An account of the indians' customs and their origin together with a treatise on the inca legends, history and social institutions.2 Austin: University of Texas Press, 1979.

[8] COBO, B. Inca Religion and Customs. Austin: University of Texas Press, 1990.

[9] CURRAN, J. M.; MEIGHAN, I. G.; SIMPSON, D. D. A.; ROGERS, G.; FALLICK, A. E. 87Sr/86Sr: a New Discriminant for Provenancing Neolithic Porcellanite Artifacts from Ireland. Journal of Anthropological Sciences, [S. l.], v. 79, p. 713-720, 2001.

[10] D'ALTROY, T. N. History of the Inca Realm. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

[11] EL GAYAR, E. L.; JONES, M. J. Metallurgical investigation of iron plate found in 1837 in the Great Pyramid at Giza, Egypt. Journal of the Historical Metallurgy Society, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 75-83, 1989.

[12] GREENFELD, H. S. The origins of metallurgy: distinguishing stone from metal cut marks on bones from archaeological sites. Journal of Archaeological Science,3 [S. l.], v. 26, p. 797-808, 1999.

[13] GUIRAO, P. O Enígma dos Maias. São Paulo: Hemus, 1983.

[14] HANKE, L. The Imperial City of Potosi: An Unwritten Chapter in the History of Spanish America. The Hague, 1956.

[15] HAYDEN, B. The cultural capacities of Neandertals: A review and reevaluation. Journal of Human Evolution, [S. l.], v. 24, p. 113-146, 1993.

[16] KLEIN, S.; HAUPTMANN, A. Iron Age leaded tin bronzes from Khirbet edh-Dharih, Jordan. Journal of Archaeological Science, [S. l.], v. 26, p. 1075-1082, 1999.

[17] LOPEZ-MORILLAS, F. M. Tales of Potosi: Bartolome Arzans de Orsua y Vela (R. C. Paden, Trans.). Providence: R.I., 1975.

[18] MACNUTT, F. A. De Orbe Novo. In: The Eight Decades of Peter Martyr. [S. l.], v. 1, 2004.

[19] MALPASS, M. A. Daily Life in The Inca Empire. Connecticut: Greenwood Press, 1996.

[20] MARCILLY, J. Grandes Civilizações Desaparecidas. Rio de Janeiro: Editions Ferni, 1978.

[21] NAVARRO, R. F. A Evolução dos Materiais. Parte 1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. REMAP, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 1-11, 2006.

[22] NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. Parte II: a contribuição das civilizações pré-colombianas. REMAP, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 15-24, 2008.

[23] OLSEN, S. L. Surface modification on bone: trampling versus butchery. Journal of Archaeological Science, [S. l.], v. 15, p. 535-553, 1988.

[24] OLSON, G. B. Beyond discovery: Design for a new material world. Beyond discovery: Design for a new material world, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 175-190, 2001.

[25] POLLETTE, L.; UGARTE, N.; CHIANELLI, R. In-Situ Identification of Palygorskite in Maya Blue Samples Using Synchrotron X-ray Powder Diffraction. Scientific American Discovering Archaeology,4 [S. l.], v. 2, n. 4, p. 46, ago. 2000.

[26] ROSEN, S. A. The adoption of metallurgy in the Levant: a lithic perspective. Current Anthropology, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 255-261, 1984.

[27] ROSENFELD, A.; ILANI, S.; DVORACHEK, M. Bronze Alloys from Canaan During the Middle Bronze Age. Journal of Archaeological Science, [S. l.], v. 24, p. 857-864, 1997.

[28] SHERBY, O. D.; WADSWORTH, J. Ancient blacksmiths, the Iron Age, Damascus steels, and modern metallurgy. Journal of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 117, p. 347-353, 2001.

[29] STEVANOVIC, M. The Age of Clay: The Social Dynamics of House Destruction. Journal of Anthropological Archaeology, [S. l.], v. 16, p. 334-395, 1997.

[30] STIERLIN, H. Living Architecture: Mayan. New York: Grosset & Dunlap, 1964.

[31] STIERLIN, H. Teotihuacán: a morada dos deuses. História Viva, São Paulo, n. 45, p. 4-11, jun. 2007.

[32] TORQUEMADA, J. de. Monarquía Indiana. De los veinte y un libros rituales y monarquía indiana, con el origen y guerras de los indios occidentales, de sus poblazones, descubrimiento, conquista, conversión y otras cosas maravillosas de la mesma tierra.5 Cidade do México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1975.

[33] WALDBAUM, J. C. The coming of the age of iron. New Haven: Yael University Press, 1980.

CAPÍTULO

02 O papel transformador dos materiais na sociedade moderna: benefícios e avanços inovadores

Resumo: Os materiais constituem a espinha dorsal da sociedade moderna, permeando todos os aspectos da vida, desde a infraestrutura básica até as mais complexas inovações tecnológicas. Sua evolução contínua tem sido o motor por trás de avanços sem precedentes na qualidade de vida, no desenvolvimento tecnológico, na sustentabilidade e no crescimento econômico global. Este relatório explora as múltiplas facetas dessa importância, destacando os benefícios e as inovações que moldam o presente e pavimentam o caminho para um futuro mais próspero e eficiente. A capacidade de manipular e otimizar as propriedades dos materiais tem permitido à humanidade superar barreiras, criar soluções para desafios complexos e impulsionar o progresso em escala global.

1. INTRODUÇÃO: A BASE MATERIAL DA CIVILIZAÇÃO MODERNA

Os materiais formam a fundação de tudo o que nos rodeia, desde os objetos cotidianos mais simples até as tecnologias de ponta que definem a era moderna. Sua importância é inegável e abrange um vasto espectro da nossa existência.[1] A ciência dos materiais, um campo interdisciplinar que investiga a relação intrínseca entre a estrutura de um material e suas propriedades, busca otimizar suas aplicações, tornando-as mais práticas e eficientes em diversos contextos.[2]

Historicamente, o progresso humano tem sido intrinsecamente ligado à capacidade de manipular e inovar materiais. Desde a Idade da Pedra, onde a seleção e o aprimoramento de ferramentas de sílex e obsidiana foram cruciais para a sobrevivência e o desenvolvimento de habilidades, até a Idade do Bronze e do Ferro, que revolucionaram a agricultura, a guerra e a construção, cada salto civilizacional foi acompanhado pela descoberta e aprimoramento de novos materiais.[3] A invenção da baquelite, o primeiro plástico totalmente sintético e comercializável em 1907, exemplifica de forma contundente como uma única inovação material pode transformar indústrias inteiras, desde o setor automotivo até os bens de consumo.[4]

A contínua evolução dos materiais não apenas possibilita o surgimento de novas tecnologias, mas também remodela fundamentalmente as estruturas sociais, os modelos econômicos e o dia a dia das pessoas. A taxa de inovação em materiais está diretamente correlacionada com o ritmo do progresso societal. Sem a constante introdução de novos materiais ou o aprimoramento dos existentes, muitos avanços tecnológicos e sociais seriam impossíveis ou severamente limitados. Este cenário sublinha que o investimento em ciência dos materiais não é meramente um imperativo industrial ou tecnológico, mas uma estratégia nacional e global essencial para o progresso sustentado e a competitividade. A capacidade de uma nação para inovar e liderar em tecnologia está intrinsecamente ligada à sua proficiência e investimento neste campo fundamental.

2. PILARES DO PROGRESSO: COMO OS MATERIAIS IMPULSIONAM O DESENVOLVIMENTO SOCIETAL

2.1. IMPULSIONANDO A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Novos materiais são a força motriz por trás da criação de dispositivos cada vez mais eficientes e compactos, que permeiam a vida moderna. Exemplos notáveis incluem smartphones, computadores, painéis solares e baterias de alta capacidade, todos eles dependentes de avanços contínuos na ciência dos materiais.[1] A maleabilidade e a condutividade elétrica de certos metais, por exemplo, são características cruciais que possibilitam a fabricação de máquinas mais eficientes e avançadas. Isso se observa desde componentes eletrônicos minúsculos até equipamentos de grande porte, como turbinas eólicas e veículos espaciais, onde o metal desempenha um papel indispensável.[6] A nanotecnologia, por sua vez, ao permitir o controle preciso da estrutura dos materiais em escala nanométrica, possibilita a modificação de propriedades fundamentais, como a condutividade elétrica e a resistência térmica, resultando em dispositivos eletrônicos de ponta com desempenho superior.[7]

Os materiais funcionam como habilitadores multi-setoriais da inovação, estendendo seu impacto muito além de uma única indústria. As informações disponíveis demonstram que os materiais impulsionam a inovação em setores tão diversos quanto eletrônicos (smartphones, computadores, chips), energia (painéis solares, baterias,

turbinas eólicas), aeroespacial, automotivo e maquinário industrial em geral.[1] Essa capacidade de permitir avanços em múltiplos domínios cria um ciclo de feedback positivo. Por exemplo, inovações em baterias avançadas inicialmente desenvolvidas para eletrônicos podem ser adaptadas e refinadas para veículos elétricos, acelerando o progresso tecnológico geral. A interconexão das aplicações dos materiais significa que uma descoberta em um tipo de material pode desencadear uma cascata de inovações em campos aparentemente não relacionados. Essa dinâmica ressalta a importância estratégica de uma abordagem holística para a pesquisa de materiais, reconhecendo que os investimentos podem gerar benefícios compostos em todo o ecossistema tecnológico, em vez de serem isolados por setor.

2.2. ELEVANDO A QUALIDADE DE VIDA

A evolução dos materiais tem um impacto direto e profundo na melhoria da qualidade de vida humana. Materiais mais leves e resistentes permitem a construção de estruturas mais seguras e duráveis, como pontes, edifícios e veículos.[1] As ligas metálicas avançadas, por exemplo, conferem maior leveza e resistência à indústria aeroespacial e automotiva, contribuindo para uma maior eficiência no consumo de combustíveis e um aumento substancial na segurança estrutural dos transportes.[7]

Na área da saúde, os materiais biocompatíveis são indispensáveis para o desenvolvimento de próteses e implantes médicos, que restauram funções corporais e facilitam a recuperação após lesões ou doenças.[1] A ciência dos materiais contribui diretamente para o desenvolvimento de biomateriais que resultam em implantes mais saudáveis e seguros, como válvulas cardíacas, próteses de quadril, implantes dentários e lentes de contato.[2] A inovação na saúde, frequentemente viabilizada por novos materiais, inclui tecnologias que transformam o atendimento, como aparelhos de ultrassom de bolso e o uso de realidade virtual na reabilitação, que oferecem benefícios claros em comparação com as práticas anteriores.[9]

A melhoria nas propriedades dos materiais, como resistência, leveza e biocompatibilidade, leva diretamente à redução de riscos associados a falhas de infraestrutura e complicações médicas. Isso, por sua vez, contribui para um aumento da confiança pública na tecnologia e nos sistemas de saúde, com o potencial de estender a expectativa de vida humana e aprimorar o bem-estar geral. Os avanços em biomateriais, em particular, vão além da simples substituição de partes do corpo; eles se concentram na integração com o organismo para restaurar funções naturais, resultando em uma qualidade de vida significativamente superior para indivíduos com condições médicas. Essa dimensão sublinha o aspecto humanitário da ciência dos materiais, demonstrando seu impacto profundo nas necessidades humanas fundamentais: segurança, saúde e conforto. Além disso, destaca a importância ética de continuar a pesquisa nessas áreas vitais.

2.3. HABILITANDO A SUSTENTABILIDADE E A ECONOMIA CIRCULAR

A busca por materiais mais sustentáveis é um pilar fundamental para reduzir o impacto ambiental da produção industrial e assegurar recursos para as futuras gerações. Materiais recicláveis, biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis são cada vez mais valorizados e essenciais para esse objetivo.[1] A ciência dos materiais contribui

ativamente para a criação de produtos mais ecológicos e sustentáveis, minimizando os impactos ambientais negativos.[2]

A economia circular, um modelo que prioriza a redução do consumo de materiais e serviços, a reutilização de materiais e a reciclagem de resíduos sólidos, é uma prática crucial para a sustentabilidade do planeta.[10] Empresas que adotam essa abordagem se beneficiam com a melhoria da eficiência de materiais e energia, o que se traduz em reduções de custos operacionais e na obtenção de vantagens competitivas no mercado.[11] A logística reversa, um componente chave da economia circular, não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também profissionaliza e promove o aumento da renda de catadores de materiais recicláveis, melhorando suas condições de vida e trabalho.[12]

Exemplos de materiais ecologicamente corretos que demonstram esses princípios incluem o papel e o papelão, que se destacam por sua alta reciclabilidade, flexibilidade, economia e por serem provenientes de fontes renováveis.[13] Novas gerações de tecidos sustentáveis, como os feitos de fibra de bananeira e laranja, estão revolucionando as indústrias da moda e da decoração, oferecendo alta resistência e alternativas inovadoras ao algodão e à seda.[14] Além disso, alternativas à base de plantas, como embalagens de cogumelo, podem substituir plásticos convencionais e são facilmente decompostas, muitas vezes podendo ser compostadas diretamente pelos consumidores.[13]

A transição para materiais sustentáveis e modelos de economia circular estabelece um ciclo virtuoso. Os benefícios ambientais, como a redução de resíduos e o menor consumo de energia, geram benefícios econômicos, incluindo economia de custos, a criação de novos mercados para materiais reciclados e uma vantagem competitiva. Esses ganhos econômicos, por sua vez, podem financiar novas inovações em materiais sustentáveis, ao mesmo tempo em que geram benefícios sociais por meio da criação de empregos e da melhoria das condições de trabalho no setor de reciclagem. Isso aponta para uma transformação sistêmica dos processos industriais e das cadeias de suprimentos. Essa perspectiva redefine a sustentabilidade não como um mero custo ou uma questão de conformidade, mas como uma oportunidade significativa para o crescimento econômico, a equidade social e a resiliência a longo prazo. Isso implica que a competitividade econômica futura estará fortemente ligada à capacidade de uma nação para a circularidade dos materiais e a inovação sustentável.

2.4. FOMENTANDO O CRESCIMENTO ECONÔMICO E A GERAÇÃO DE EMPREGOS

A descoberta e o desenvolvimento contínuo de novos materiais são catalisadores essenciais para o crescimento econômico, gerando empregos e novas oportunidades de negócios em diversos setores.[1] O trabalho na indústria de transformação de materiais é crucial para o desenvolvimento econômico e a inovação tecnológica de um país. Essa indústria é responsável por agregar valor às matérias-primas, transformando-as em produtos acabados, e por impulsionar a produção e a produtividade em escala nacional.[10]

A indústria de transformação de materiais atrai investimentos significativos, tanto domésticos quanto estrangeiros, que são fundamentais para a modernização e expansão das empresas. Esses investimentos permitem a aquisição de novas tecnologias, maquinários e equipamentos, impulsionando a competitividade e a capacidade produtiva.[15] A expansão do setor de materiais, por sua vez, resulta na criação de novas vagas de emprego em diferentes níveis de qualificação, desde a demanda por mão de obra

qualificada com habilidades técnicas e conhecimento especializado até a necessidade de inovadores e criadores que trazem novas ideias e perspectivas para otimizar processos.[10]

O mercado global de materiais avançados, que inclui nanomateriais, compósitos e biomateriais, é um setor de rápido crescimento e com projeções robustas. Avaliado em aproximadamente US$ 69,29 bilhões em 2024, espera-se que atinja US$ 107,87 bilhões em 2032, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de cerca de 6,5%.[16] Outra projeção estima o mercado em US$ 68,51 bilhões em 2023, crescendo para US$ 121,76 bilhões em 2033 com um CAGR de 5,92%.[17] Esse crescimento é impulsionado pela demanda acelerada por substâncias leves, duráveis e de alto desempenho em indústrias como aeroespacial, automotiva e eletrônica. A busca por soluções eficientes em termos de energia e a crescente conscientização sobre materiais sustentáveis na construção e na saúde também contribuem significativamente para essa expansão.[16]

O crescimento no setor de materiais não é isolado; ele gera um poderoso efeito multiplicador em toda a economia. À medida que os materiais se tornam mais avançados e acessíveis em termos de custo [5], eles permitem a produção de bens acabados de maior valor agregado [15], o que, por sua vez, impulsiona as exportações e fortalece a balança comercial de um país. As projeções de crescimento substancial para o mercado de materiais avançados indicam um futuro promissor para este setor, sugerindo a criação contínua de empregos e oportunidades de investimento, não apenas na produção de materiais, mas em todas as indústrias que os utilizam. Isso enfatiza que o investimento estratégico em ciência e engenharia de materiais é um caminho direto para a competitividade econômica e a resiliência nacional, fomentando um ecossistema onde a inovação em materiais se traduz diretamente em liderança industrial e uma forte posição econômica global.

Tabela 2: Projeções de Crescimento do Mercado Global de Materiais Avançados

Característica	Detalhes	Referências
Valor do Mercado (2023/2024)	Aproximadamente US$ 69,29 bilhões (2024) ou US$ 68,51 bilhões (2023)	16
Valor Projetado (2032/2033)	Atingir US$ 107,87 bilhões (2032) ou US$ 121,76 bilhões (2033)	16
Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR)	Cerca de 6,5% (2024-2032) ou 5,92% (2023-2033)	16
Principais Categorias Impulsionadoras	Nanomateriais, compósitos, biomateriais	16
Principais Indústrias Beneficiadas	Aeroespacial, automotiva, eletrônica, energia, saúde	16

3. MATERIAIS TRANSFORMADORES: UMA ANÁLISE APROFUNDADA POR CATEGORIA

A diversidade e a especialização dos materiais modernos permitem um leque vastíssimo de aplicações, cada categoria contribuindo de maneira única para o avanço tecnológico e a melhoria da qualidade de vida.

3.1. METAIS E LIGAS AVANÇADAS

Os metais, desde a antiguidade, têm sido fundamentais para o desenvolvimento humano. Na era moderna, os avanços em metalurgia resultaram em ligas com propriedades extraordinárias. Aços de alta resistência são amplamente utilizados na construção civil, conferindo maior segurança e durabilidade a edifícios e infraestruturas críticas. Paralelamente, metais leves como o alumínio são indispensáveis na indústria aeroespacial, onde a redução de peso é crucial para a eficiência de combustível e o desempenho de aeronaves e veículos espaciais.[1] O aprimoramento constante na utilização e no desenvolvimento de novas ligas e técnicas de produção solidifica o papel vital do metal no progresso tecnológico e econômico, garantindo sua relevância contínua.[6] Ligas metálicas avançadas, em particular, proporcionam maior leveza e resistência para a indústria aeroespacial e automobilística, contribuindo diretamente para uma maior eficiência no consumo de combustíveis e um aumento significativo na segurança estrutural dos veículos.[7]

A evolução dos metais representa uma transição de estruturas básicas para materiais que habilitam a eficiência em larga escala. O foco na "leveza" e "resistência" em ligas avançadas [7] se traduz diretamente em melhorias na eficiência de combustível em transportes e maior segurança. Isso significa que os avanços nas ligas metálicas contribuem significativamente para a redução dos custos operacionais e do impacto ambiental, ao mesmo tempo em que aprimoram a segurança do usuário e a longevidade do produto. Há uma clara mudança de simplesmente

fabricar coisas para *otimizar* seu desempenho e consumo de recursos ao longo de todo o ciclo de vida. Essa perspectiva destaca como as categorias de materiais tradicionais estão sendo redefinidas por avanços científicos, tornando-as cruciais para abordar desafios contemporâneos como o consumo de energia e os padrões de segurança, estendendo assim sua relevância e impacto.

3.2. CERÂMICAS DE ALTA PERFORMANCE

As cerâmicas avançadas são componentes essenciais em uma vasta gama de aplicações de alta tecnologia. Elas são empregadas em componentes eletrônicos de precisão, motores a jato, onde sua resistência a altas temperaturas é crítica, e em próteses dentárias, devido à sua biocompatibilidade e durabilidade.[1] Suas aplicações se estendem ainda mais a setores eletro-eletrônicos, térmicos, mecânicos, ópticos, químicos e biomédicos.[18] Exemplos práticos incluem componentes para motores de combustão, fibras ópticas para telecomunicações e sistemas micro eletromecânicos (MEMS), que são fundamentais para sensores e atuadores modernos.[19] Essas cerâmicas possuem elevadas resistências térmica e química, características que as tornam indispensáveis para aplicações em reatores e outros ambientes extremos onde materiais convencionais falhariam.[7]

As cerâmicas, historicamente associadas à fragilidade, transformaram-se em componentes críticos de alta tecnologia. As informações disponíveis demonstram que as cerâmicas modernas possuem propriedades que superam as limitações tradicionais, permitindo aplicações de alto desempenho. A alta resistência térmica e química das cerâmicas avançadas [7] permite o desenvolvimento de tecnologias que operam em condições extremas, expandindo os limites do desempenho. Seu uso em eletrônicos e MEMS [18] também aponta para seu papel crucial na miniaturização e na engenharia de

precisão, elementos vitais para a computação e sensoriamento modernos. Isso ilustra como a ciência dos materiais transforma limitações percebidas em vantagens estratégicas. A pesquisa fundamental na estrutura e propriedades dos materiais [2] pode desbloquear funcionalidades inteiramente novas, tornando uma classe de materiais indispensável para as aplicações tecnológicas mais exigentes e impulsionando a inovação em diversos setores de alta tecnologia.

3.3. POLÍMEROS VERSÁTEIS E BIOPLÁSTICOS

Os polímeros, comumente conhecidos como plásticos, são um dos materiais mais importantes da era moderna, com uma presença ubíqua em uma infinidade de produtos, desde embalagens até componentes eletrônicos.[1] Eles estão presentes em eletrodomésticos, celulares, veículos e até mesmo em equipamentos médicos que salvam vidas, demonstrando sua indispensabilidade.[4] A criação da baquelite em 1907 revolucionou a indústria ao oferecer um material resistente, leve e de custo acessível. Durante a Segunda Guerra Mundial, a baquelite e outros polímeros desempenharam um papel estratégico, substituindo materiais escassos como o aço e a borracha na fabricação de equipamentos essenciais.[4]

A crescente preocupação ambiental impulsionou significativamente as pesquisas sobre polímeros sustentáveis, como bioplásticos e materiais biodegradáveis. Esses avanços visam reduzir a dependência de fontes fósseis e minimizar os impactos negativos no meio ambiente, utilizando fontes renováveis como cana-de-açúcar e milho em sua síntese.[4]

Os polímeros, de materiais de massa, evoluíram para soluções para desafios de sustentabilidade. A importância histórica dos plásticos demonstra sua adaptabilidade a necessidades sociais críticas. A tendência atual em direção a bioplásticos e materiais biodegradáveis [4] evidencia que a indústria de polímeros está inovando ativamente para enfrentar os desafios ambientais, transformando um material frequentemente associado à poluição em um potencial líder em soluções sustentáveis. Isso indica uma mudança proativa no design de materiais, impulsionada pela consciência ambiental global, que está criando novos mercados e aplicações. Essa trajetória ilustra como a inovação em materiais não se limita a criar novas funcionalidades, mas também a reengenharia de materiais existentes para atender aos valores sociais e às pressões regulatórias em constante evolução, garantindo sua relevância contínua e contribuição positiva em um mundo com recursos limitados.

3.4. MATERIAIS COMPÓSITOS REVOLUCIONÁRIOS

Os materiais compósitos representam uma classe de materiais que combinam as propriedades de diferentes componentes para criar um produto final com características superiores. Essa sinergia permite a criação de produtos leves e resistentes, como as pás de turbinas eólicas, que são cruciais para a eficiência da geração de energia renovável.[1] Geralmente, os compósitos consistem em uma fase de reforço, composta por partículas, fibras ou folhas, envolvida por uma matriz. Eles podem ser classificados de diversas formas, como reforçados com partículas ou fibras, ou como estruturais, incluindo laminados e painéis sanduíche.[19] Os compósitos estão em constante evolução, sendo desenvolvidos para atender às demandas crescentes das indústrias modernas, oferecendo propriedades e desempenho que superam os materiais tradicionais.[20]

Os compósitos exemplificam a sinergia de materiais para desempenho sem precedentes. A capacidade de "combinar propriedades" [1] significa que os compósitos oferecem um nível de liberdade de design e otimização de desempenho, como relações específicas de resistência-peso, que é revolucionário. Isso permite o desenvolvimento de estruturas altamente eficientes, como as grandes pás de turbinas eólicas [1], que são essenciais para a infraestrutura de energia renovável. Essa sinergia permite que os engenheiros adaptem os materiais precisamente aos requisitos da aplicação, expandindo os limites do que é mecanicamente possível. Isso destaca um nível meta de inovação de materiais, onde o foco muda da descoberta de materiais individuais para a combinação inteligente e a arquitetura de materiais, levando a ganhos exponenciais em desempenho e abrindo portas para categorias de produtos e soluções de engenharia inteiramente novas.

3.5. MATERIAIS INTELIGENTES E RESPONSIVOS

Os materiais inteligentes, também conhecidos como "smart materials" ou materiais responsivos, são aqueles que se alteram tanto na forma quanto nas propriedades, respondendo e se adaptando a estímulos externos como temperatura, luz, campo elétrico ou mecânico.[1] Exemplos cotidianos incluem canecas que mudam de cor com a temperatura do líquido e lentes de óculos que escurecem no sol e voltam ao normal em ambientes internos.[21] Aplicações mais avançadas e transformadoras abrangem roupas esportivas com válvulas de ventilação que reagem à umidade, edifícios que se adaptam às condições atmosféricas (vento, calor, chuva) e medicamentos que são liberados na corrente sanguínea ao detectar sinais de infecção.[3]

Inovações notáveis incluem máscaras produzidas com tecidos que repelem vírus e roupas usadas em hospitais feitas com materiais que reduzem a possibilidade de contágio. Na engenharia civil, o concreto auto-reparável, que sela fissuras com microrganismos, demonstra a capacidade desses materiais de aumentar a durabilidade e reduzir a necessidade de manutenção.[21] O mercado global de materiais inteligentes está em franca expansão, avaliado em cerca de US$ 44 bilhões em 2019 e com estimativa de atingir US$ 110,18 bilhões em 2026, indicando um investimento significativo por parte de grandes potências mundiais.[21]

Os materiais inteligentes representam a convergência entre materiais e autonomia. As informações disponíveis descrevem materiais inteligentes como "responsivos" e "adaptáveis" a estímulos externos, levando a funcionalidades como auto-reparação, adaptação ambiental e respostas direcionadas. Eles também indicam um crescimento significativo do mercado.[1] Ao contrário dos materiais passivos, os materiais inteligentes

respondem ativamente às condições, resultando em maior segurança (concreto auto-reparável, máscaras antivirais), eficiência aprimorada (roupas esportivas adaptáveis, edifícios reativos) e precisão (liberação direcionada de medicamentos). Isso reduz a necessidade de intervenção humana constante ou de sistemas de controle externos, levando a produtos e infraestruturas mais resilientes, eficientes e amigáveis ao usuário. O crescimento substancial do mercado [21] indica uma forte demanda por essas funcionalidades "proativas" em vários setores. Isso representa uma mudança de paradigma no design de materiais, passando de propriedades estáticas para comportamentos dinâmicos e adaptativos. Sugere um futuro onde nosso ambiente e

produtos são inerentemente mais responsivos, robustos e eficientes, borrando as linhas entre objetos passivos e sistemas ativos.

Tabela 1: Principais Categorias de Materiais e Seus Benefícios Chave na Sociedade Moderna

Categoria de Material	Propriedades Chave	Benefícios e Aplicações Chave	Referências
Metais e Ligas Avançadas	Alta resistência, leveza, maleabilidade, condutividade elétrica	Segurança estrutural (construção, veículos), eficiência energética (aeroespacial, automotiva), durabilidade, progresso tecnológico e econômico	1
Cerâmicas de Alta Performance	Altas resistências térmica e química, biocompatibilidade, durabilidade	Componentes eletrônicos, motores a jato, próteses dentárias, fibras ópticas, sistemas micro eletromecânicos (MEMS), aplicações em reatores	1
Polímeros Versáteis e Bioplásticos	Resistência, leveza, acessibilidade, versatilidade, biodegradabilidade, renovabilidade	Embalagens, componentes eletrônicos, eletrodomésticos, veículos, equipamentos médicos, redução da dependência de fósseis, minimização de impactos ambientais	1
Materiais Compósitos Revolucionários	Leveza, alta resistência, combinação de propriedades	Pás de turbinas eólicas, produtos leves e resistentes com desempenho superior, liberdade de design	1
Materiais Inteligentes e Responsivos	Capacidade de resposta a estímulos externos (temperatura, luz), auto-reparação, adaptação	Lentes de óculos adaptativas, roupas esportivas inteligentes, edifícios responsivos, concreto auto-reparável, medicamentos de liberação direcionada, máscaras antivirais	1

4. FRONTEIRAS DA INOVAÇÃO: TENDÊNCIAS EMERGENTES E BENEFÍCIOS FUTUROS

4.1. MATERIAIS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS

A tecnologia moderna está tornando as iniciativas de energia sustentáveis cada vez mais econômicas e eficientes.[22] Os materiais avançados são cruciais para a otimização da captação, conversão e armazenamento de energia em diversas fontes renováveis, impulsionando a transição global para um futuro mais limpo.

Na energia solar, os painéis fotovoltaicos coletam a luz solar e a convertem em eletricidade, enquanto a energia solar térmica concentrada (CSP) utiliza espelhos para concentrar a luz solar e gerar energia térmica para produção de eletricidade.[23] Para a energia eólica, as turbinas aproveitam a energia cinética do ar para gerar eletricidade. Materiais como o polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente utilizados em conduítes para monitorar a energia suplementada à rede, sendo uma opção ambientalmente responsável, eficiente em energia durante a fabricação e robusta o suficiente para funcionar em condições extremas.[22]

A energia hidrelétrica, que já é a maior contribuinte de eletricidade renovável globalmente, utiliza a energia das marés, corpos d'água e barragens para mover turbinas geradoras de eletricidade.[23] A energia geotérmica aproveita o vapor quente e o vapor de

hidrocarbonetos de reservatórios no interior da Terra, e bombas de calor geotérmicas são usadas para aquecimento, resfriamento e fornecimento de água quente em edifícios.[23]

Os materiais são um pilar fundamental da transição energética global. Os avanços em materiais para energia solar e eólica [1] e para infraestruturas associadas, como os conduítes de PEAD [22], não se limitam a criar componentes individuais; eles permitem a

escalabilidade e a *eficiência* de parques de energia renovável inteiros. Materiais mais leves, fortes, eficientes e duráveis reduzem o custo de produção de energia, aumentam o rendimento energético e estendem a vida útil da infraestrutura verde, tornando a energia renovável economicamente competitiva e globalmente viável. Isso aborda diretamente o aspecto da "sustentabilidade" mencionado como um benefício chave.[1] Essa dinâmica posiciona a ciência dos materiais como um habilitador crítico das metas climáticas globais e da independência energética, sugerindo que o investimento contínuo em materiais para energias renováveis será fundamental para alcançar um futuro sustentável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

4.2. NANOMATERIAIS: DESVENDANDO O POTENCIAL EM ESCALA ATÔMICA

A nanotecnologia representa uma fronteira da ciência dos materiais que manipula a estrutura molecular dos materiais em escala nanométrica para alterar suas propriedades intrínsecas, resultando em aplicações verdadeiramente revolucionárias.[24] Esse controle sem precedentes permite a criação de materiais com características inovadoras, como condutividade elétrica aprimorada, resistência térmica superior e durabilidade excepcional.[7]

As aplicações transformadoras dos nanomateriais são vastas e impactantes. Incluem partículas invisíveis capazes de combater células cancerígenas com precisão, microprocessadores mais rápidos e eficientes em energia, baterias com durabilidade dez vezes maior e painéis solares que rendem o dobro em comparação com as tecnologias convencionais.[24] Nanopartículas funcionais permitem avanços significativos na medicina, como a entrega direcionada de medicamentos para medicina de precisão e tratamento de câncer, além de melhorias na energia e proteção ambiental através de catalisadores mais eficientes.[20]

O grafeno, uma forma de carbono modificado, é um exemplo notável de nanomaterial, sendo mais duro que o aço, mais leve que o alumínio e quase transparente, com um vasto potencial de aplicações.[24] O mercado global de nanotecnologia está em rápida expansão, com um valor projetado superior a US$ 125 bilhões nos próximos cinco anos, o que reflete o reconhecimento de seu imenso potencial.[24]

Os nanomateriais representam a revolução da precisão e da eficiência extrema. As informações disponíveis consistentemente destacam que os nanomateriais envolvem a manipulação da matéria em escala atômica/molecular para alcançar propriedades drasticamente alteradas e superiores, como baterias dez vezes mais duráveis ou painéis solares com rendimento dobrado.[7] A capacidade de projetar materiais em nanoescala permite uma miniaturização significativa, como em microprocessadores e sistemas de entrega de medicamentos, ao mesmo tempo em que proporciona saltos de desempenho em eficiência, durabilidade e condutividade. Esse nível de precisão possibilita aplicações altamente direcionadas, como o combate a células cancerígenas ou catalisadores de alta eficiência, gerando impactos profundos em campos como medicina e energia. Isso não é apenas uma melhoria incremental, mas uma redefinição fundamental das capacidades

dos materiais. A nanotecnologia está posicionada para ser uma nova revolução industrial [24], indicando que seu impacto será sistêmico, transformando múltiplos setores ao possibilitar dispositivos e processos com eficiências e funcionalidades antes inimagináveis. A liderança tecnológica futura dependerá fortemente do domínio da engenharia em nanoescala.

4.3. MANUFATURA ADITIVA (IMPRESSÃO 3D): PERSONALIZAÇÃO E EFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO

A tecnologia de impressão 3D está impulsionando uma mudança fundamental na indústria, passando da fabricação em massa para a fabricação personalizada, permitindo a produção de itens sob demanda e altamente customizados.[26] Suas vantagens incluem uma significativa economia de custos de fabricação, uma melhoria notável na eficiência da produção e a capacidade única de realizar a fabricação integrada de estruturas complexas que seriam difíceis ou impossíveis de produzir com métodos tradicionais.[26]

A impressão 3D possibilita a prototipagem rápida com alta precisão a partir de uma variedade de materiais funcionais, reduzindo drasticamente o tempo de desenvolvimento de produtos, de dias ou até semanas para apenas algumas horas.[27] Isso acelera a verificação e a alteração de ideias de projeto, permitindo ciclos de inovação mais ágeis. O método de formação e fabricação centralizado da impressão 3D melhora significativamente a eficiência de uso dos materiais, ajuda a reduzir o consumo de energia e o desperdício de material, tornando o processo de produção inerentemente mais ecológico.[26]

A impressão 3D representa a revolução da fabricação que otimiza recursos e acelera a inovação. A capacidade de prototipar rapidamente [27] e criar estruturas complexas e integradas [26] democratiza o design e acelera os ciclos de inovação. Além disso, ao reduzir o desperdício de material e o consumo de energia [26], a impressão 3D se alinha perfeitamente com os objetivos de sustentabilidade, tornando a fabricação intrinsecamente mais ecológica. Essa tecnologia permite a produção "just-in-time" de peças altamente personalizadas, reduzindo estoques e complexidades da cadeia de suprimentos, o que oferece benefícios econômicos e ambientais significativos. Esta não é apenas uma técnica de fabricação; é uma tecnologia disruptiva que apoia tanto o "desenvolvimento de novos materiais" (ao permitir testes rápidos de novas formulações de materiais) quanto os objetivos de "sustentabilidade" [1], criando um efeito sinérgico para o progresso industrial futuro. Representa uma mudança em direção a paradigmas de fabricação mais ágeis, responsivos e ambientalmente conscientes.

4.4. BIOMATERIAIS: AVANÇOS NA MEDICINA E ENGENHARIA DE TECIDOS

Os biomateriais, sejam de origem natural ou sintética, desempenham um papel crucial e cada vez mais proeminente na medicina moderna. Eles são projetados para restaurar funções e facilitar a cura para pessoas após ferimentos ou doenças, melhorando significativamente a qualidade de vida.[8] São utilizados em uma vasta gama de aplicações clínicas e médicas para apoiar, melhorar ou substituir tecidos danificados ou funções biológicas específicas.[8]

Exemplos de aplicações incluem dispositivos biomédicos como biossensores e tubos de circulação sanguínea, materiais implantáveis como suturas, placas, substitutos

ósseos, válvulas cardíacas, lentes, dentes e próteses de quadril, além de dispositivos para liberação controlada de medicamentos.[8] O campo moderno dos biomateriais é intrinsecamente interdisciplinar, combinando conhecimentos de medicina, biologia, física, química e engenharia de tecidos.[8]

Espera-se um avanço considerável na engenharia de tecidos, visando aplicações em medicina regenerativa. Essa área requer melhorias significativas no projeto de suportes (conhecidos como *scaffolds*) para o crescimento de células de tecidos normais ou células-tronco, que vão além de prover uma matriz biocompatível, estimulando ativamente o crescimento celular.[28] Muitos biomateriais são biodegradáveis e bioabsorvíveis, o que significa que são gradualmente eliminados do corpo após cumprir sua função, minimizando a necessidade de remoção cirúrgica e otimizando a integração biológica.[8]

Os biomateriais atuam como uma ponte vital entre a engenharia e a biologia para a saúde humana. As informações disponíveis consistentemente destacam o papel dos biomateriais em "restaurar funções", "facilitar a cura" e "melhorar os resultados de saúde" por meio de implantes, próteses, entrega de medicamentos e engenharia de tecidos.[1] A evolução dos biomateriais, especialmente com os avanços esperados na engenharia de tecidos e nos *scaffolds* [28], significa uma mudança de simplesmente

substituir partes danificadas do corpo para ativamente *regenerá-las*. Isso abre as portas para uma medicina verdadeiramente personalizada, onde os materiais são projetados para interagir perfeitamente com os sistemas biológicos, potencialmente levando a curas para condições anteriormente intratáveis. A biodegradabilidade e a bioabsorção [8] aprimoram ainda mais sua integração e reduzem complicações a longo prazo. Essa área da ciência dos materiais possui implicações éticas e sociais profundas, oferecendo esperança para uma vida saudável prolongada e transformando o panorama do tratamento médico, tornando-o mais integrado aos processos de cura naturais do corpo. Isso posiciona a ciência dos materiais na vanguarda da inovação em saúde humana.

4.5. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DESCOBERTA DE MATERIAIS

A inteligência artificial (IA) está revolucionando a descoberta de novos materiais, um processo que historicamente tem sido caro e demorado.[29] Ferramentas avançadas de IA, como a GNoMe do Google DeepMind, já demonstraram um potencial extraordinário ao descobrir mais de 2,2 milhões de novos cristais inorgânicos.[29] Notavelmente, quase 400.000 desses materiais hipotéticos poderiam ser produzidos em condições laboratoriais, indicando a viabilidade de sua aplicação prática.[30]

O objetivo primordial da IA nesse campo é diminuir drasticamente o custo e o tempo associados à descoberta de novos materiais, um processo que, como exemplificado pelo desenvolvimento de baterias de íon de lítio, pode levar décadas de pesquisa.[29] As aplicações potenciais dessa pesquisa são vastas e incluem o aprimoramento de tecnologias cruciais como baterias de melhor desempenho, painéis solares mais eficientes e chips de computador mais avançados.[30]

A IA está acelerando a era da descoberta de materiais e a inovação em escala. As informações disponíveis demonstram que as ferramentas de IA estão descobrindo milhões de novos materiais em uma taxa sem precedentes, reduzindo significativamente o custo e o tempo historicamente associados à descoberta de materiais.[29] Ao encurtar drasticamente o cronograma de descoberta, a IA permite um aumento exponencial na taxa

de inovação de materiais. Esse pipeline de descoberta rápida se traduz diretamente em um desenvolvimento mais veloz de novas tecnologias, como baterias, painéis solares e chips, proporcionando uma vantagem competitiva e estratégica significativa para nações e indústrias que utilizam a IA nesse campo. Isso desloca o gargalo da descoberta para a síntese e aplicação, alterando fundamentalmente o cenário de P&D. Isso destaca uma meta-tendência: a tecnologia (IA) está agora acelerando a própria base de outras tecnologias (materiais). Essa sinergia promete um futuro onde a inovação de materiais não é limitada pela intuição humana ou pela experimentação laboriosa, mas é impulsionada pelo poder computacional, levando a uma nova era de avanço tecnológico sem precedentes. Isso também sugere que a liderança econômica e tecnológica futura dependerá cada vez mais da integração da IA na pesquisa científica fundamental.

5. CONCLUSÃO: O FUTURO PROMISSOR IMPULSIONADO PELOS MATERIAIS

Os materiais desempenham um papel crucial e insubstituível na sociedade moderna, influenciando desde a forma como construímos nossas cidades e infraestruturas até a maneira como nos comunicamos, nos transportamos e nos tratamos.[1] A análise apresentada demonstra que a evolução contínua na ciência e engenharia de materiais é a força motriz silenciosa por trás de avanços tecnológicos e melhorias na qualidade de vida em todos os setores.

Os benefícios dos materiais são multifacetados: eles impulsionam a inovação tecnológica ao permitir dispositivos mais eficientes e compactos; elevam a qualidade de vida ao possibilitar estruturas mais seguras e avanços revolucionários na medicina; habilitam a sustentabilidade e a economia circular através do desenvolvimento de materiais ecológicos e processos de produção mais eficientes; e fomentam o crescimento econômico e a geração de empregos, com um mercado global de materiais avançados em franca expansão.

As fronteiras da inovação, como os materiais para energias renováveis, os nanomateriais, a manufatura aditiva (impressão 3D), os biomateriais e a aplicação da inteligência artificial na descoberta de novos materiais, prometem um futuro de transformações ainda mais profundas. Essas áreas não apenas otimizam o que já existe, mas abrem caminhos para soluções que antes eram consideradas ficção científica, como materiais auto-reparáveis, dispositivos médicos regenerativos e a aceleração exponencial da descoberta científica.

A busca por materiais mais eficientes, sustentáveis e inovadores não é apenas um desafio contínuo para a comunidade científica e industrial, mas uma imensa oportunidade para construir um futuro melhor.[1] Os avanços em materiais, impulsionados por pesquisa interdisciplinar e a sinergia com novas tecnologias como a IA, estão pavimentando o caminho para uma sociedade mais eficiente, segura, sustentável e próspera. A inovação em materiais continuará a ser o motor silencioso por trás das grandes transformações, garantindo que a humanidade possa enfrentar os desafios emergentes e alcançar novos patamares de progresso e bem-estar.

REFERÊNCIAS

[1] NAVARRO, Rômulo Feitosa**.** Materiais e Ambiente. João Pessoa: EDUFPB, 2001.

[2] ACCOR. **12 tipos de tecidos sustentáveis**. [s.d.]. Disponível em: https://all.accor.com/a/pt-br/limitless/thematics/lifestyle-trends/12-tipos-de-tecidos-sustentaveis.html. Acesso em: 29 jul. 2025.

[3] MATERIAIS metálicos In: CLASSIFICAÇÃO e propriedade dos materiais. [S. l.]: Plato Educacional, [s.d.]. Unidade 4, Aula 1. Disponível em: https://alexandria-html-published.platosedu.io/11c27c7d-db01-4375-a201-57dab33b7be4/v1/index.html. Acesso em: 29 jul. 2025.BETA EQ. **Desenvolvimento de novos materiais: perspectivas e aplicações**. [s.d.]. Disponível em: https://betaeq.com.br/desenvolvimento-de-novos-materiais-perspectivas-e-aplicacoes/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[4] BUSINESS RESEARCH INSIGHTS. **O tamanho do mercado global de materiais avançados**. [s.d.]. Disponível em: https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/advanced-materials-market-118324. Acesso em: 29 jul. 2025.

[5] CARVALHO, Antonio José Félix de. **Entenda por que materiais avançados são importantes para a indústria**. [s.d.]. Disponível em: https://noticias.portaldaindustria.com.br/entrevistas/entenda-por-que-materiais-avancados-sao-importantes-para-a-industria/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[6] CNN BRASIL. **IA do Google encontra mais de 2 milhões de materiais que impulsionam tecnologias**. [s.d.]. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/ia-do-google-encontra-mais-de-2-milhoes-de-materiais-que-impulsionam-tecnologias/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[7] CRÉDITO DE LOGÍSTICA REVERSA. **Economia Circular: o que é e quais seus benefícios**. [s.d.]. Disponível em: https://www.creditodelogisticareversa.com.br/post/t-economia-circular-o-que-e-e-quais-seus-beneficios. Acesso em: 29 jul. 2025.

[8] DIO.ME. **IA do Google revela potencial para milhares de novos materiais**. [s.d.]. Disponível em: https://www.dio.me/articles/ia-do-google-revela-potencial-para-milhares-de-novos-materiais. Acesso em: 29 jul. 2025.

[9] DPUNION. **O que é ciência de materiais?**. [s.d.]. Disponível em: https://dpunion.com.br/o-que-e-ciencia-de-materiais/amp/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[10] DURA-LINE. **PARQUES EÓLICOS E SOLARES**. [s.d.]. Disponível em: https://www.duraline-latam.com/pt-br/Aplicacoes/energia-renovavel/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[11] ECYCLE. **Biomateriais**. [s.d.]. Disponível em: https://www.ecycle.com.br/biomateriais/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[12] EIGIER DIAGNÓSTICOS. **Inovação na área da saúde**. [s.d.]. Disponível em: https://eigierdiagnosticos.com.br/blog/inovacao-na-area-da-saude/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[13] LOURO, Henriqueta; BORGES, Teresa; SILVA, Maria João**. Nanomateriais manufaturados: novos desafios para a saúde pública**. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, v. 31, n. 2, p. 188-200, jul./dez. 2013. Acesso em: 29 jul. 2025.

[14] HINTIGO. **Qual a importância do metal para a indústria em geral?**. [s.d.]. Disponível em: https://hintigo.com.br/qual-a-importancia-do-metal-para-a-industria-em-geral/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[15] IBM. **Renewable Energy Use Cases**. [s.d.]. Disponível em: https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/renewable-energy-use-cases. Acesso em: 29 jul. 2025.

[16] IBERDROLA. **Aplicações da nanotecnologia**. [s.d.]. Disponível em: https://www.iberdrola.com/quem-somos/nosso-modelo-inovacao/aplicacoes-da-nanotecnologia. Acesso em: 29 jul. 2025.

[17] IBERDROLA. **Materiais inteligentes: aplicações e exemplos**. [s.d.]. Disponível em: https://www.iberdrola.com/inovacao/materiais-inteligentes-aplicacoes-exemplos. Acesso em: 29 jul. 2025.

[18] IMPACT FIBERS. **The Development Trends of New Materials in 2025**. [s.d.]. Disponível em: https://pt.impact-fibers.com/info/the-development-trends-of-new-materials-in-17189882257531904.html. Acesso em: 29 jul. 2025.

[19] MESCLA FUTUROS. **Materiais inteligentes: o futuro das indústrias**. [s.d.]. Disponível em: https://mesclafuturos.com.br/materiais-inteligentes-o-futuro-das-industrias/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[20] MOLDIE.NET. **The Advantages and Disadvantages of 3D Printing Technology**. [s.d.]. Disponível em: https://moldie.net/pt/the-advantages-and-disadvantages-of-3d-printing-technology/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[21] NGI. **Importância econômica da indústria de materiais: inovação e empregos**. [s.d.]. Disponível em: https://www.ngi.com.br/blog/industria-de-transformacao/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[22] PACKOI. **Recyclable Packaging Materials**. [s.d.]. Disponível em: https://pt.packoi.com/blog/recyclable-packaging-materials/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[23] POLI.USP. **Cerâmicas "Avançadas" : aplicações eletro-eletrônicas, térmicas, mecânicas, ópticas, químicas, bio-médicas**. [s.d.]. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/aula10_2005%201p.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[24] PRINTIT3D. **Vantagens e Benefícios da impressão 3D**. [s.d.]. Disponível em: https://www.printit3d.com.br/post/vantagens-e-benef%C3%ADcios-da-impress%C3%A3o-3d. Acesso em: 29 jul. 2025.

[25] PROMAFLEX. **Primeiro de Maio enfatiza importância dos trabalhadores na indústria**. [s.d.]. Disponível em: https://promaflex.com.br/2024/05/01/primeiro-de-maio-enfatiza-importancia-dos-trabalhadores-na-industria/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[26] PIRES, Ana Luiza R.; BIERHALZ, Andréa C. K. Biomateriais: tipos, aplicações e mercado. Química Nova, São Paulo, v. 38, n. 7, 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/th7gjVpvdpthnctYbhtFznN. Acesso em: 29 jul. 2025. DOI: 10.5935/0100-4042.20150094.SIGMAEARTH. **O papel da economia circular no desenvolvimento sustentável**. [s.d.]. Disponível em: https://sigmaearth.com/pt/o-papel-da-economia-circular-no-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[27] SPHERICAL INSIGHTS. **Global Advanced Materials Market Insights Previsões para 2033**. [s.d.]. Disponível em: https://www.sphericalinsights.com/pt/reports/advanced-materials-market. Acesso em: 29 jul. 2025.

[28] ABIQUIM. Plástico: tudo sobre sua história, tipos, produção e reciclagem. Vamos Falar Sobre Plástico, 30 out. 2024. Disponível em: https://www.vamosfalarsobreplastico.org.br/plastico/. Acesso em: 29 jul. 2025.

CAPÍTULO

03 História da ciência e engenharia de materiais e sua importância transformadora para a humanidade

Resumo: A Ciência e Engenharia de Materiais (CEM) é um campo interdisciplinar que estuda a relação entre a estrutura, o processamento, as propriedades e o desempenho dos materiais, abrangendo desde metais e cerâmicas até polímeros e nanomateriais. A história da CEM está intrinsecamente ligada à evolução da civilização humana, com eras nomeadas em função dos materiais predominantes, como as Idades da Pedra, Bronze e Ferro. O avanço da capacidade humana de manipular e criar novos materiais tem sido um catalisador fundamental para o progresso tecnológico, social, econômico e cultural, com cada inovação abrindo novas possibilidades e gerando novas demandas. Desde o uso empírico de materiais pelas primeiras civilizações até a formalização da CEM como disciplina científica no século XX, houve uma transição para o estudo metódico e a aplicação do método científico. A Revolução Industrial, por sua vez, impulsionou a produção em massa de materiais como aço e cimento, enquanto o século XX consolidou a CEM com o desenvolvimento de polímeros sintéticos, semicondutores, cerâmicas avançadas e compósitos, o campo explora nanomateriais, biomateriais e materiais inteligentes, com o auxílio crucial da modelagem computacional e inteligência artificial, buscando soluções para desafios globais como a energia sustentável e a saúde.

1. INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS (CEM)

A Ciência e Engenharia de Materiais (CEM) configura-se como um campo do saber intrinsecamente interdisciplinar, dedicado não apenas à descoberta e ao design de novos materiais, mas fundamentalmente à compreensão das complexas e indissociáveis relações entre a estrutura interna, o processamento ao qual são submetidos, as propriedades resultantes e o desempenho final em diversas aplicações. Este campo abrangente engloba o estudo de uma vasta gama de substâncias, incluindo metais, cerâmicas, polímeros, compósitos, semicondutores e biomateriais. Em tempos mais recentes, seu escopo expandiu-se para incluir as fronteiras fascinantes dos nanomateriais, dos materiais inteligentes e daqueles projetados para a sustentabilidade.

A trajetória histórica da CEM confunde-se com a própria história da civilização. A tal ponto essa ligação é profunda que eras inteiras da humanidade são nomeadas em função dos materiais que nelas predominaram a Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Ferro. Esta nomenclatura não é fortuita; ela sublinha a importância crítica e definidora dos materiais para o desenvolvimento social, tecnológico, econômico e cultural das sociedades ao longo do tempo. Desde a confecção das primeiras ferramentas rudimentares, essenciais à sobrevivência, até o desenvolvimento das mais sofisticadas tecnologias contemporâneas, os materiais têm consistentemente servido como o alicerce sobre o qual a humanidade erigiu seu progresso. Eles foram os facilitadores da melhoria da qualidade de vida, os instrumentos da exploração de novos horizontes e os moldes que configuraram as diversas formas de organização social e os avanços tecnológicos.

A evolução da capacidade humana de manipular e criar novos materiais não pode ser vista meramente como um subproduto do avanço científico geral; ela tem sido, em si, um catalisador fundamental desse avanço. Cada novo material descoberto ou cada nova técnica de processamento desenvolvida abriu um leque de novas possibilidades tecnológicas. Estas, por sua vez, geraram novas demandas e instigaram investigações mais profundas sobre a natureza e o potencial dos materiais. Assim, a história da CEM não se desenrola de forma linear, mas sim como um ciclo contínuo e dinâmico de retroalimentação: a necessidade humana impulsiona a inovação em materiais, e esta inovação redefine as capacidades e, consequentemente, as novas necessidades da sociedade. A habilidade de uma civilização em compreender, manipular e inovar no campo dos materiais emerge, portanto, como um indicador robusto de seu nível de desenvolvimento tecnológico, sua complexidade social e sua capacidade de adaptação e transformação. Este relatório buscará delinear essa relação simbiótica, demonstrando como a CEM não apenas acompanhou, mas frequentemente liderou e tornou possíveis as grandes transformações civilizacionais.

2. DOS PRIMÓRDIOS AO ESTUDO SISTEMÁTICO: AS FUNDAÇÕES DA CEM

A jornada da humanidade com os materiais iniciou-se de forma empírica, baseada na observação, na tentativa e erro, e na transmissão de conhecimentos práticos ao longo de gerações. Este período lançou as bases para o que viria a se tornar um campo científico formal.

2.1. O USO EMPÍRICO DE MATERIAIS NAS PRIMEIRAS CIVILIZAÇÕES

As primeiras civilizações, desprovidas do conhecimento científico formal que possuímos hoje, demonstraram uma notável capacidade de identificar, processar e aplicar os materiais disponíveis em seu ambiente para suprir suas necessidades básicas e complexificar suas estruturas sociais.Na Idade da Pedra, que se estende pelos períodos Paleolítico e Neolítico, a pedra foi o material primordial. Ferramentas e armas eram confeccionadas a partir de rochas como sílex e obsidiana, através de técnicas progressivamente refinadas de lascamento e, posteriormente, polimento. Simultaneamente, a cerâmica emergiu, sendo considerada por muitos como a "mais antiga das indústrias". A descoberta de que a argila, quando moldada e submetida ao fogo, adquiria dureza e impermeabilidade, levou à criação de potes e recipientes essenciais para o armazenamento de alimentos, água e sementes, especialmente com a transição para a agricultura e a sedentarização. A durabilidade destes artefatos cerâmicos os torna testemunhos arqueológicos cruciais para a compreensão de culturas ancestrais. Paralelamente, fibras naturais, ossos e peles de animais eram habilmente processados para a confecção de vestimentas, cordas e abrigos. A Idade do Bronze, iniciada por volta de 3300 a.C., marcou uma revolução tecnológica com a descoberta da metalurgia. A liga de cobre com estanho (ou, em alguns casos, arsênio) resultou no bronze, um material significativamente mais resistente e durável que a pedra ou o cobre puro. Esta inovação permitiu a fabricação de ferramentas agrícolas mais eficientes, armas superiores e artefatos ornamentais mais elaborados. O desenvolvimento de técnicas de fundição e moldagem foi essencial para este avanço. A produção de bronze, contudo, frequentemente exigia o estabelecimento de redes de comércio para a obtenção dos minérios constituintes, que nem sempre se encontravam na mesma localidade, fomentando assim interações culturais e o desenvolvimento de sociedades mais complexas. O controle sobre as fontes de minério e as tecnologias de processamento do bronze conferia considerável poder militar e econômico. Subsequentemente, a Idade do Ferro, que se consolidou por volta de 1200 a.C., introduziu um metal ainda mais transformador. O ferro, embora mais abundante na natureza que o cobre e o estanho, apresentava desafios tecnológicos distintos, exigindo temperaturas de fusão mais elevadas e técnicas de processamento mais complexas, como a forja e, posteriormente, a cementação para aumentar sua dureza através da introdução de carbono. A disponibilidade mais ampla do minério de ferro, em comparação com os componentes do bronze, permitiu uma "democratização" relativa do acesso a ferramentas e armas de metal, impulsionando avanços na agricultura, na guerra e em diversas outras atividades produtivas. É interessante notar que existe um debate acadêmico sobre o início preciso da Idade do Ferro, com algumas evidências arqueológicas sugerindo uma manipulação mais antiga do ferro do que o período convencionalmente aceito, possivelmente remontando a 7000 a.C. e coincidindo com o Calcolítico, ou mesmo com o aproveitamento de ferro meteorítico. A Tabela 1 abaixo resume as características principais destas eras fundamentais:

Tabela 1: Eras Fundamentais e Materiais Característicos

Era	Materiais Predominantes	Principais Inovações/Técnicas	Impacto Societário Chave
Paleolítico	Pedra Lascada (sílex, obsidiana), ossos, peles, fibras	Lascamento de pedras, uso do fogo	Ferramentas de caça e coleta aprimoradas, proteção contra intempéries, início do controle do ambiente
Neolítico / "Era da Argila"	Pedra Polida, Cerâmica, madeira, fibras	Polimento de pedra, agricultura, domesticação, modelagem e queima de argila, tecelagem	Sedentarização, armazenamento de alimentos, desenvolvimento de aldeias, especialização do trabalho
Idade do Cobre (Calcolítico)	Cobre nativo e processado, pedra, cerâmica	Primeiras técnicas de fundição de cobre, martelamento	Ferramentas e adornos de cobre, transição gradual da pedra para o metal, aumento da complexidade social
Idade do Bronze (c. 3300 – 1200 a.C.)	Bronze (cobre + estanho/arsênio)	Fundição em moldes, desenvolvimento de ligas metálicas, técnicas avançadas de metalurgia	Armas e ferramentas superiores, expansão do comércio, surgimento de elites guerreiras, desenvolvimento urbano
Idade do Ferro (c. 1200 – c. 586 a.C.)	Ferro, Aço (inicialmente por cementação)	Forjamento, redução de minério de ferro em altas temperaturas, cementação	Ampla disponibilidade de metal, revolução agrícola e militar, expansão de impérios, desenvolvimento de novas tecnologias

2.2. A TRANSIÇÃO PARA A OBSERVAÇÃO E O ESTUDO METÓDICO

"De Re Metallica" de Georgius Agricola (1556) foi um divisor de águas na história do estudo dos materiais ocorreu no século XVI com a publicação póstuma da obra *De Re Metallica* (Sobre a Natureza dos Metais ou Minerais), de Georgius Agricola (latinização de Georg Bauer) em 1556. Este monumental tratado ofereceu uma compilação exaustiva e sistemática do conhecimento da época sobre prospecção mineira, extração de minérios, metalurgia (fundição e refino de diversos metais como ouro, prata, cobre) e até mesmo a fabricação de vidro e produtos químicos utilizados nesses processos. A singularidade e a importância de *De Re Metallica* residem em sua abordagem metodológica. Foi o primeiro grande compêndio sobre mineração e metalurgia a ser explicitamente fundamentado na observação direta, na pesquisa de campo e na descrição detalhada das práticas e tecnologias existentes – o que hoje reconheceríamos como uma abordagem precursora do método científico. Agricola não se limitou a compilar textos antigos; ele visitou minas, conversou com mineiros e metalurgistas, e registrou meticulosamente os processos. A obra foi enriquecida com 289 xilogravuras de alta qualidade, que ilustravam com clareza e precisão as ferramentas, máquinas e técnicas descritas, desde o trabalho em galerias subterrâneas até os complexos fornos de fundição. Esta combinação de texto descritivo rigoroso e ilustrações técnicas detalhadas tornou *De Re Metallica* um marco na literatura científica e técnica do Renascimento, permanecendo como a obra de referência definitiva na área por quase dois séculos.Paralelamente, em sua obra *De Natura Fossilium* (Sobre a Natureza dos Fósseis – termo que na época englobava minerais, rochas e outras substâncias terrestres), Agricola apresentou a primeira classificação sistemática dos minerais baseada em suas propriedades físicas observáveis (como cor, dureza, brilho, forma geométrica), o que lhe rendeu o epíteto de "pai da mineralogia". Ele foi, possivelmente, o primeiro a distinguir entre substâncias "simples" e "compostas" no reino mineral.O trabalho de Agricola, embora ainda inserido em um contexto onde o conhecimento químico formal era incipiente, representou um afastamento significativo

das tradições puramente especulativas ou esotéricas, como a alquimia, que também se dedicava à transformação da matéria, mas com objetivos e métodos distintos. Enquanto a alquimia buscava a transmutação de metais em ouro ou o elixir da longa vida, muitas vezes envolta em simbolismo e segredo, Agricola focou-se na descrição racional e na otimização de processos práticos e economicamente relevantes. Sua ênfase na observação da realidade e na documentação sistemática dos fenômenos e técnicas começou a pavimentar o caminho para uma compreensão mais científica dos materiais, constituindo um elo crucial entre o conhecimento artesanal acumulado e a emergente ciência moderna. *De Re Metallica* não foi apenas um manual técnico; foi um reflexo de uma nova mentalidade que valorizava o empirismo e a disseminação do conhecimento prático, elementos essenciais para a subsequente Revolução Científica.

2.3. IMPACTO INICIAL NA MINERAÇÃO, METALURGIA E SOCIEDADE

O conhecimento empírico, acumulado desde os primórdios, já havia permitido às civilizações antigas explorar uma vasta gama de materiais naturais: pedras, madeiras, fibras vegetais e animais, peles e, crucialmente, minérios. O domínio do fogo foi uma conquista tecnológica primordial, possibilitando a transformação desses materiais: a cozedura do barro deu origem à cerâmica, e as altas temperaturas permitiram a fundição e o refino dos metais. A metalurgia, em particular, conferiu vantagens adaptativas e poder às sociedades que a desenvolveram. Os hititas, por exemplo, expandiram seus domínios em grande parte devido ao seu domínio inicial da tecnologia do ferro. A obra de Agricola, ao sistematizar e divulgar o conhecimento metalúrgico mais avançado de sua época, contribuiu para a melhoria das práticas de mineração e produção de metais na Europa, impactando a economia e a capacidade tecnológica do período.

3. A REVOLUÇÃO CIENTÍFICA E O ILUMINISMO (SÉCULOS XVII-XVIII) DESVENDANDO AS PROPRIEDIEDADES DOS MATERIAIS

Os séculos XVII e XVIII testemunharam uma transformação profunda na maneira como o conhecimento era adquirido e validado. A Revolução Científica e o subsequente Iluminismo trouxeram consigo o desenvolvimento e a consolidação do método científico, que começou a ser aplicado sistematicamente ao estudo do mundo natural, incluindo as propriedades e o comportamento dos materiais.

3.1. O PAPEL DO MÉTODO CIENTÍFICO EMERGENTE

O século XVII, em particular, emergiu como um período onde a ciência e a invenção se entrelaçaram, impulsionadas pela aplicação progressiva do método científico. Este método, caracterizado pela observação sistemática, análise de dados, formulação de hipóteses, experimentação controlada para gerar novos dados e a reavaliação crítica das hipóteses iniciais, começou a permear diversas áreas do saber, incluindo aquelas relacionadas aos materiais, como a mineração e a metalurgia . Filósofos naturais, como eram chamados os cientistas da época, passaram a valorizar cada vez mais os experimentos que pudessem ser verificados e repetidos por outros pesquisadores. Isso levou a uma maior ênfase no registro detalhado dos equipamentos utilizados, dos procedimentos experimentais e das variáveis mensuradas . A fundação de sociedades científicas, como a Royal Society de Londres (1660), e a publicação de periódicos, como o

Philosophical Transactions, foram cruciais para a disseminação, discussão e validação dessas novas descobertas e métodos experimentais.

3.2. CONTRIBUIÇÕES DE PIONEIROS E O AVANÇO NO ENTENDIMENTO FUNDAMENTAL

Diversos pensadores e experimentadores deste período fizeram contribuições significativas que, direta ou indiretamente, avançaram a compreensão fundamental dos materiais:

- William Gilbert (c. 1544-1603): no limiar do século XVII, com sua obra *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (Sobre o Ímã e os Corpos Magnéticos, e sobre o Grande Ímã, a Terra), publicada em 1600, Gilbert realizou o primeiro estudo experimental sistemático do magnetismo . Utilizando esferas de magnetita (um óxido de ferro natural) e agulhas imantadas, ele investigou as propriedades de atração, repulsão e orientação dos ímãs. Seu trabalho é frequentemente citado como um exemplo primordial da aplicação do método experimental e da rejeição de explicações puramente especulativas, o que levou muitos a considerá-lo o "pai da ciência experimental" . A investigação de Gilbert sobre um material específico e suas propriedades intrínsecas foi um passo importante para a futura ciência dos materiais.
- Robert Boyle (1627-1691): conhecido por seus trabalhos sobre as propriedades dos gases (notadamente a Lei de Boyle), Boyle também contribuiu para o estudo dos materiais através de seus experimentos meticulosos utilizando a bomba de ar, que ele ajudou a aperfeiçoar. Ele investigou os efeitos da pressão do ar (ou da sua ausência, o vácuo) sobre diversas substâncias e fenômenos, incluindo a combustão, a respiração e as propriedades de certos materiais. Seus estudos sobre a "elasticidade" do ar e o comportamento da matéria sob diferentes pressões foram fundamentais para a física e a química nascentes.
- Robert Hooke (1635-1703): contemporâneo de Boyle, Hooke foi um cientista experimental de vastos interesses. Sua obra *Micrographia* (1665), famosa pelas detalhadas ilustrações de observações feitas com um microscópio, revelou a estrutura fina de diversos materiais, tanto biológicos quanto inorgânicos. Embora não focado exclusivamente nas propriedades dos materiais no sentido moderno, seu trabalho pioneiro com a microscopia abriu novas perspectivas para a investigação da relação entre a microestrutura e as características macroscópicas da matéria. Sua formulação da lei da elasticidade (Lei de Hooke), que descreve como um sólido se deforma sob a ação de uma força, é uma contribuição direta e fundamental para a mecânica dos materiais.
- René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757): no início do século XVIII, Réaumur destacou-se por suas investigações sistemáticas sobre o ferro e o aço. Em seu influente tratado *L'Art de convertir le fer forgé en acier, et l'art d'adoucir le fer fondu* (A Arte de Converter Ferro Forjado em Aço, e a Arte de Amaciar o Ferro Fundido), publicado em 1722, ele detalhou os processos de produção e, crucialmente, foi um dos primeiros a reconhecer e investigar o papel do carbono na determinação das propriedades do aço, como sua dureza . Réaumur utilizou o microscópio para examinar as diferentes estruturas cristalinas do ferro fundido, do aço e do ferro forjado, correlacionando essas microestruturas com suas

propriedades mecânicas. Ele também desenvolveu um tipo de porcelana (a "porcelana de Réaumur") e contribuiu para o aperfeiçoamento de fornos metalúrgicos, como o forno de cúpula. O trabalho de Réaumur exemplifica a aplicação rigorosa do método científico – observação, experimentação, análise microscópica e busca por relações causa-efeito – para entender e controlar as propriedades de um material industrialmente vital.

- Ernst Chladni (1756-1827): no final do século XVIII, o físico e músico alemão Ernst Chladni realizou experimentos notáveis sobre a vibração de placas. Ao espalhar areia fina sobre placas de metal ou vidro e fazê-las vibrar com um arco de violino, ele observou que a areia se acumulava ao longo de linhas onde a placa permanecia estacionária (nós), formando padrões complexos e belos, hoje conhecidos como "figuras de Chladni". Este trabalho pioneiro em acústica visualizou os modos de vibração de superfícies e demonstrou experimentalmente a relação entre as propriedades do material (como sua forma, dimensões, densidade e elasticidade – por exemplo, módulo de Young e razão de Poisson), as frequências de vibração e os fenômenos ondulatórios resultantes. As investigações de Chladni foram fundamentais não apenas para a acústica e o design de instrumentos musicais, mas também para o campo emergente da mecânica dos materiais e a caracterização de suas propriedades vibracionais e elásticas.

3.3. IMPLICAÇÕES PARA AS PRIMEIRAS INDÚSTRIAS E TECNOLOGIAS

A transição de um conhecimento puramente artesanal e empírico para um entendimento mais fundamental e quantificável das propriedades dos materiais, impulsionada pela Revolução Científica, começou a ter implicações práticas. A capacidade de prever o comportamento dos materiais sob diferentes condições, de controlar sua composição e microestrutura para obter propriedades desejadas (como no caso do aço de Réaumur), e de caracterizar suas respostas mecânicas ou vibracionais (como nos estudos de Hooke e Chladni) lançou as bases para inovações tecnológicas mais racionais e eficientes. Embora a aplicação industrial em larga escala dessas descobertas viesse a se consolidar principalmente com a Revolução Industrial, este período foi crucial para estabelecer os princípios científicos que a tornariam possível. A instrumentalização da observação, com o uso crescente de microscópios, bombas de vácuo, balanças de precisão e outros aparatos, foi um fator determinante. Esses instrumentos não apenas ampliaram os sentidos dos pesquisadores, permitindo-lhes investigar fenômenos antes inacessíveis, mas também facilitaram a medição e a quantificação, elementos essenciais para transformar o estudo dos materiais de uma arte em uma ciência.

4. A ERA INDUSTRIAL (SÉCULOS XVIII-XIX): NOVOS MATERIAIS E A TRANSFORMAÇÃO DA SOCIEDADE

A Revolução Industrial, iniciada na segunda metade do século XVIII e estendendo-se pelo século XIX, representou um período de transformações tecnológicas, econômicas e sociais sem precedentes. No cerne dessas mudanças estava a capacidade de produzir e utilizar materiais em uma escala e com uma eficiência nunca antes vistas. A interação entre as descobertas científicas emergentes, as necessidades da engenharia e as demandas da indústria impulsionou uma aceleração drástica no desenvolvimento e aplicação de materiais.

4.1. AVANÇOS NA METALURGIA E SEU IMPACTO

A metalurgia, especialmente a do ferro e do aço, foi um dos pilares da Revolução Industrial . A crescente demanda por máquinas, motores a vapor, ferrovias e estruturas maiores exigia metais mais resistentes, mais abundantes e mais baratos.

4.1.1. PRODUÇÃO DE FERRO E AÇO

Inovações como o uso do coque (carvão mineral processado) em vez do carvão vegetal para a fundição do ferro, desenvolvida por Abraham Darby no início do século XVIII, permitiram a produção de ferro gusa em maiores quantidades e com melhor qualidade. Posteriormente, processos como o de pudlagem, patenteado por Henry Cort em 1784, possibilitaram a conversão do ferro gusa em ferro forjado em larga escala.

O desenvolvimento do processo Bessemer em meados do século XIX por Henry Bessemer (e independentemente por William Kelly nos EUA) revolucionou a produção de aço, tornando-a mais rápida e barata. Este processo consistia em insuflar ar através do ferro gusa fundido para remover impurezas e reduzir o teor de carbono, transformando-o em aço. Similarmente, o desenvolvimento posterior do forno de soleira aberta (processo Siemens-Martin) também contribuiu para a produção massiva de aço .

A capacidade de produzir aço em grandes volumes e a um custo acessível teve um impacto transformador. O aço substituiu o ferro e a madeira em inúmeras aplicações, desde trilhos ferroviários e locomotivas até pontes, navios e estruturas de edifícios. A metalurgia extrativa de minério de ferro expandiu-se enormemente, e a metalurgia física, o estudo das propriedades físicas e mecânicas dos metais e suas ligas, começou a ganhar importância para otimizar o desempenho desses materiais.

4.1.2. O DESENVOLVIMENTO DO CIMENTO E A REVOLUÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Outro material fundamental para a infraestrutura da Era Industrial foi o cimento. Embora formas de cimento hidráulico fossem conhecidas desde a antiguidade (por exemplo, o cimento romano feito com cinzas vulcânicas), o século XIX viu o desenvolvimento do cimento moderno.

No século XVIII, Bryan Higgins já havia patenteado um tipo de cimento hidráulico (estuque) para uso como reboco externo. Em 1824, Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland, assim chamado devido à sua semelhança de cor com a pedra de Portland, uma rocha calcária da Inglaterra. Este cimento, produzido pela queima de calcário e argila em altas temperaturas e posterior moagem fina, quando misturado com água, areia e outros agregados, forma o concreto.

O concreto, especialmente quando combinado com barras de aço para formar o concreto armado (uma inovação creditada a vários pioneiros em meados do século XIX, incluindo François Coignet que construiu a primeira casa de concreto armado em 1853), tornou-se um material de construção versátil e durável. Ele combinava a alta resistência à compressão do concreto com a alta resistência à tração do aço, permitindo a construção de estruturas maiores, mais complexas e mais resistentes ao fogo, como edifícios, pontes, túneis, barragens e portos. A disponibilidade do cimento Portland e do concreto armado foi essencial para a rápida urbanização e o desenvolvimento da infraestrutura industrial.

4.2. OS PRIMÓRDIOS DA QUÍMICA DE POLÍMEROS E SUAS PRIMEIRAS APLICAÇÕES

A Era Industrial também testemunhou os primeiros passos significativos na modificação de polímeros naturais e na síntese dos primeiros polímeros artificiais, prenunciando a "Era dos Plásticos" do século XX.

A borracha natural, conhecida há séculos, tinha limitações devido à sua pegajosidade e sensibilidade à temperatura. Em 1839, Charles Goodyear descobriu acidentalmente o processo de vulcanização, que consistia em aquecer a borracha com enxofre. Este processo criava ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, tornando a borracha mais elástica, resistente e estável em uma faixa mais ampla de temperaturas, abrindo um vasto leque de aplicações industriais, desde pneus até correias e isolantes.

A celulose, um polímero natural abundante na madeira e no algodão, também começou a ser quimicamente modificada. Em 1862, Alexander Parkes apresentou a Parkesina, um dos primeiros plásticos semissintéticos, produzido a partir da nitrocelulose (celulose tratada com ácido nítrico) e um solvente. Embora não tenha sido um grande sucesso comercial, foi um precursor importante do celuloide, desenvolvido por John Wesley Hyatt por volta de 1869, ao plastificar a nitrocelulose com cânfora. O celuloide encontrou aplicações em filmes fotográficos, bolas de bilhar e outros objetos.

Estes desenvolvimentos, embora modestos em comparação com a explosão da indústria de polímeros no século seguinte, foram cruciais. Eles demonstraram que as propriedades dos polímeros naturais podiam ser significativamente alteradas e melhoradas através de tratamentos químicos, e que era possível criar materiais inteiramente novos com características desejáveis, pavimentando o caminho para a revolução dos plásticos.

4.3. OUTRAS INOVAÇÕES EM MATERIAIS

A efervescência científica e tecnológica do período também levou a outras inovações materiais importantes. A invenção do termopar por Thomas Johann Seebeck em 1821 permitiu a medição de temperatura baseada em efeitos termoelétricos, com implicações para o controle de processos industriais e pesquisa científica.

O desenvolvimento de processos fotográficos baseados na sensibilidade de compostos de prata à luz, por inventores como Louis Daguerre e William Fox Talbot nas décadas de 1830 e 1840, representou um novo tipo de "material" capaz de registrar imagens, com profundo impacto cultural e científico.

A Revolução Industrial, portanto, não foi apenas uma revolução de máquinas e energia, mas também uma revolução de materiais. A capacidade de produzir aço, cimento e borracha vulcanizada em massa e a baixo custo, juntamente com os primeiros passos na química de polímeros, forneceu os blocos de construção físicos para a transformação da sociedade. As demandas da indústria estimularam a inovação em materiais, enquanto os novos materiais, por sua vez, possibilitaram novas tecnologias e processos industriais, num ciclo de retroalimentação que continua a caracterizar a relação entre a CEM e o progresso humano.

5. O SÉCULO XX: NASCIMENTO E CONSOLIDAÇÃO DA CEM COMO DISCIPLINA CIENTÍFICA

O século XX marcou um período de extraordinário avanço na Ciência e Engenharia de Materiais, caracterizado não apenas pela descoberta e desenvolvimento de uma miríade de novos materiais, mas também pela formalização da CEM como um campo acadêmico e científico distinto e interdisciplinar.

5.1. O ESTABELECIMENTO FORMAL DA CEM EM UNIVERSIDADES E INSTITUIÇÕES DE PESQUISA

As raízes intelectuais da CEM podem ser rastreadas até o Iluminismo, quando pesquisadores começaram a aplicar o pensamento analítico da química, física e engenharia para compreender observações empíricas em metalurgia e mineralogia. No entanto, durante grande parte do século XIX e início do século XX, o estudo dos materiais estava fragmentado. Departamentos universitários focavam-se em áreas específicas, como engenharia metalúrgica ou engenharia cerâmica, refletindo a ênfase histórica nesses materiais. Os polímeros, por exemplo, eram geralmente estudados nos departamentos de química ou engenharia química. A mudança começou a se consolidar a partir da década de 1940 e se intensificou nas décadas de 1950 e 1960. Percebeu-se que, para criar, descobrir e projetar novos materiais de forma eficaz, era necessária uma abordagem unificada, baseada nos princípios fundamentais que governam as relações entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho de todos os materiais. Este paradigma tornou-se o alicerce intelectual da CEM.Muitas universidades começaram a reestruturar seus programas, combinando ou renomeando departamentos existentes de metalurgia e cerâmica e integrando formalmente a ciência dos polímeros e a física do estado sólido. Um exemplo notável é a Northwestern University, que em 1955 ampliou o escopo de seu departamento de metalurgia para incluir polímeros, metais, materiais eletrônicos e cerâmicas, renomeando-o oficialmente para "materials science" (ciência dos materiais) em 1959. Iniciativas governamentais também desempenharam um papel crucial nesse desenvolvimento, especialmente nos Estados Unidos. Após a Segunda Guerra Mundial, houve uma pressão crescente do governo e da indústria para que as universidades oferecessem uma educação mais ampla e fundamental em materiais, considerada essencial para o desenvolvimento de novos produtos e a melhoria dos existentes. A Advanced Research Projects Agency (ARPA, hoje DARPA), por exemplo, financiou a criação de laboratórios de pesquisa interdisciplinar em materiais em diversas universidades, com um forte componente educacional, catalisando o crescimento da CEM como disciplina. Essa formalização permitiu um ensino mais eficiente, onde conceitos básicos de física do estado sólido, termodinâmica, cinética, estrutura molecular e cristalina, e propriedades mecânicas poderiam ser ensinados de forma integrada para todas as classes de materiais, em vez de separadamente para cada uma.

5.2. A ERA DOS POLÍMEROS SINTÉTICOS E SUA UBIQUIDADE

O século XX foi, sem dúvida, a era de ouro dos polímeros sintéticos, materiais que transformaram radicalmente a vida cotidiana e a indústria.

5.2.1. BAQUELITE (1907)

Desenvolvida por Leo Baekeland, a baquelite foi o primeiro plástico totalmente sintético produzido em massa. Suas propriedades de isolamento elétrico, resistência ao calor e moldabilidade a tornaram ideal para uma vasta gama de aplicações, desde carcaças de rádios e telefones até componentes elétricos e utensílios domésticos, estabelecendo as bases para a revolução dos polímeros.

5.2.2. NYLON (1935)

A síntese do nylon por Wallace Carothers na DuPont marcou o advento das fibras sintéticas de alto desempenho. Forte, leve, elástico e resistente à abrasão, o nylon encontrou aplicações iniciais em cerdas de escovas de dente e meias femininas, mas sua importância estratégica foi demonstrada durante a Segunda Guerra Mundial, quando foi usado em paraquedas, cordas e outros equipamentos militares.

5.2.3. POLIETILENO (PE) (1933)

Descoberto nos laboratórios da Imperial Chemical Industries (ICI), o polietileno é um polímero termoplástico leve, flexível e com excelentes propriedades de isolamento elétrico . Sua versatilidade levou a uma miríade de aplicações, desde filmes para embalagens e sacolas plásticas até garrafas, brinquedos e isolamento de cabos.

5.2.4. TEFLON (POLITETRAFLUORETILENO, PTFE) (1938)

Descoberto acidentalmente por Roy Plunkett na DuPont, o Teflon é conhecido por sua excepcional inércia química, baixo coeficiente de atrito (antiaderência) e resistência a altas temperaturas. Tornou-se indispensável em revestimentos de panelas, vedações, isolantes em aplicações aeroespaciais e na indústria química.

5.2.5. OUTROS POLÍMEROS IMPORTANTES DESENVOLVIDOS NO SÉCULO XX

Nesta categoria, incluem-se o policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP) – cuja produção foi otimizada pelos catalisadores Ziegler-Natta– e polietileno tereftalato (PET). A capacidade de sintetizar polímeros com uma vasta gama de propriedades físicas e químicas levou à sua onipresença na sociedade moderna, substituindo materiais tradicionais em muitas aplicações e criando possibilidades inteiramente novas.

5.3. O ADVENTO E IMPACTO DOS SEMICONDUTORES E DA ELETRÔNICA

Paralelamente à revolução dos polímeros, o século XX testemunhou o nascimento e a ascensão da eletrônica de estado sólido, impulsionada pela física e engenharia de materiais semicondutores.

A história dos dispositivos semicondutores remonta ao final do século XIX e início do XX, com a invenção do retificador de estado sólido. No entanto, o marco fundamental foi a invenção do transistor nos Laboratórios Bell em 1947-1948 por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley. O transistor, um dispositivo semicondutor capaz de amplificar e comutar sinais eletrônicos, era muito menor, mais eficiente e mais confiável que os volumosos tubos de vácuo que dominavam a eletrônica até então.

A invenção subsequente do circuito integrado (CI), independentemente por Jack Kilby da Texas Instruments (1958) e Robert Noyce da Fairchild Semiconductor (1959), foi outro salto quântico. O CI permitiu que múltiplos transistores, resistores, capacitores e suas interconexões fossem fabricados em um único chip de material semicondutor (predominantemente silício).

A capacidade de miniaturização e integração aumentou exponencialmente nas décadas seguintes, levando ao desenvolvimento de LSI (Large-Scale Integration), VLSI (Very-Large-Scale Integration) e ULSI (Ultra-Large-Scale Integration), com milhões e, posteriormente, bilhões de transistores em um único chi. Este progresso, muitas vezes encapsulado pela Lei de Moore, foi o motor da revolução digital, possibilitando computadores pessoais, smartphones, a internet e uma vasta gama de dispositivos eletrônicos que definem a vida moderna.

5.4. DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICAS AVANÇADAS E COMPÓSITOS

O século XX também viu avanços significativos no desenvolvimento de cerâmicas com propriedades especializadas e na criação de materiais compósitos de alto desempenho.

5.4.1. CERÂMICAS AVANÇADAS (OU TÉCNICAS/FINAS)

Diferentemente das cerâmicas tradicionais (como tijolos ou louças), as cerâmicas avançadas são produzidas a partir de matérias-primas de alta pureza e com processos de fabricação rigorosamente controlados para obter microestruturas precisas e, consequentemente, propriedades excepcionais. Exemplos incluem:

- Alumina (Al_2O_3): usada em isoladores de velas de ignição de automóveis desde a década de 1920, e posteriormente em uma ampla gama de aplicações devido à sua dureza, resistência ao desgaste e isolamento elétrico. A descoberta de métodos de produção de alumina de alta pureza a baixo custo em 1936 foi um marco.
- Ferritas: cerâmicas magnéticas desenvolvidas a partir da década de 1940, usadas em ímãs permanentes, núcleos de indutores e transformadores, e memórias magnéticas.
- Biocerâmicas: materiais cerâmicos projetados para aplicações médicas, como a Bioglass® desenvolvida por Larry Hench em 1969, capaz de se ligar quimicamente ao tecido ósseo. Outras biocerâmicas incluem hidroxiapatita e zircônia, usadas em implantes dentários e ortopédicos.

- Cerâmicas para aplicações extremas: ladrilhos de isolamento térmico à base de sílica, usados no ônibus espacial da NASA para proteger a espaçonave do calor intenso durante a reentrada atmosférica, são um exemplo notável.

5.5. COMPÓSITOS MODERNOS

Materiais multifásicos projetados para exibir uma combinação de propriedades que geralmente não podem ser obtidas em nenhum dos componentes individuais.

- A baquelite já pode ser considerada um dos primeiros compósitos modernos, combinando uma resina polimérica com cargas como farinha de madeira ou fibras de amianto.
- A fibra de vidro, desenvolvida na década de 1930, consiste em fibras de vidro finas embutidas em uma matriz polimérica (geralmente uma resina epóxi ou poliéster). Sua alta relação resistência-peso, resistência à corrosão e facilidade de moldagem levaram a aplicações em cascos de barcos, carrocerias de automóveis, pás de turbinas eólicas e equipamentos esportivos.
- A fibra de carbono, com sua excepcional rigidez e resistência aliadas à baixa densidade, tornou-se um material de escolha para aplicações aeroespaciais, automotivas de alto desempenho e esportivas avançadas a partir da segunda metade do século XX.
- O Kevlar®, uma fibra de aramida sintética desenvolvida na década de 1970, é conhecido por sua extraordinária resistência à tração e ao impacto, sendo usado em coletes à prova de balas, equipamentos de proteção e componentes aeroespaciais.

A força motriz por trás de muitos desses avanços no século XX foi a crescente compreensão da necessidade de uma abordagem interdisciplinar. A criação de polímeros sintéticos exigiu a colaboração entre químicos orgânicos e engenheiros químicos. O desenvolvimento de semicondutores dependeu intrinsecamente da física do estado sólido, da química de materiais e da engenharia elétrica. As cerâmicas avançadas e os compósitos se beneficiaram da sinergia entre química, física, ciência dos materiais e engenharia mecânica. A própria emergência da CEM como um campo unificado reflete o reconhecimento de que os desafios para criar materiais com propriedades radicalmente novas ou combinações otimizadas de propriedades não poderiam ser resolvidos dentro dos limites estreitos de uma única disciplina tradicional. A compreensão fundamental da relação estrutura-propriedade-processamento-desempenho exigiu, e continua a exigir, a integração de conhecimentos de física, química e diversas engenharias.

6. FRONTEIRAS CONTEMPORÂNEAS E O FUTURO DA CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

A Ciência e Engenharia de Materiais continua a ser um campo dinâmico e em rápida evolução, impulsionando inovações em praticamente todos os setores da tecnologia e da sociedade. As fronteiras atuais estão explorando a matéria em escalas cada vez menores, buscando inspiração na natureza, desenvolvendo materiais com respostas programadas e enfrentando desafios globais urgentes, como a necessidade de energia sustentável e soluções médicas avançadas.

6.1. NANOMATERIAIS

A Revolução dos nanomateriais, definidos como materiais que possuem pelo menos uma dimensão externa na faixa de 1 a 100 nanômetros (1 nm = 10^{-9} m), representam uma das áreas mais promissoras e transformadoras da CEM contemporânea. Nesta escala, os materiais frequentemente exibem propriedades físicas, químicas e biológicas radicalmente diferentes de seus correspondentes em macroescala. Essas diferenças surgem devido a dois principais fatores: o aumento drástico da razão entre área superficial e volume, que intensifica as interações na superfície do material; e os efeitos de confinamento quântico, que alteram o comportamento dos elétrons e, consequentemente, as propriedades eletrônicas e ópticas. As abordagens para a síntese de nanomateriais são geralmente classificadas como *top-down* (de cima para baixo), onde estruturas maiores são reduzidas à nanoescala (por exemplo, litografia), ou *bottom-up* (de baixo para cima), onde os nanomateriais são construídos átomo por átomo ou molécula por molécula (por exemplo, auto-montagem molecular, deposição química de vapor). Há um interesse crescente em métodos de "síntese verde", que utilizam precursores biológicos ou processos menos tóxicos para reduzir o impacto ambiental da produção de nanomateriais.As aplicações potenciais dos nanomateriais são vastas e abrangem múltiplos campos:

- Medicina: nanopartículas, nanogéis, lipossomas e dendrímeros estão sendo desenvolvidos para sistemas de liberação controlada e direcionada de fármacos (drug delivery), incluindo vacinas (nanovacinas), com o objetivo de aumentar a eficácia terapêutica e reduzir efeitos colaterais. Nanomateriais também são usados como agentes de contraste em técnicas de imagem médica e em nanossensores para diagnóstico precoce de doenças.
- Eletrônica e Óptica: pontos quânticos, nanofios e nanotubos de carbono possuem propriedades eletrônicas e ópticas únicas, promissoras para a fabricação de transistores mais rápidos e eficientes, células solares de maior rendimento, displays de alta resolução e sensores ultrassensíveis.
- Energia: nanomateriais são cruciais para o desenvolvimento de baterias com maior capacidade de armazenamento e recarga mais rápida, supercapacitores de alta densidade de energia, células a combustível mais eficientes e nanocatalisadores para reações químicas em processos de conversão de energia . Nanogeradores, que convertem energia mecânica em elétrica na nanoescala, também são uma área de pesquisa ativa.
- Catálise: a alta área superficial dos nanomateriais os torna excelentes catalisadores ou suportes para catalisadores, aumentando a eficiência de reações químicas em processos industriais e ambientais.

Apesar do enorme potencial, a disseminação dos nanomateriais também levanta preocupações sobre seus possíveis impactos na saúde humana e no meio ambiente, devido ao seu tamanho diminuto que facilita a penetração em sistemas biológicos e sua potencial persistência. Portanto, a avaliação de riscos e o desenvolvimento de diretrizes para o uso seguro e sustentável de nanomateriais são áreas de pesquisa e regulamentação ativas.

6.2. BIOMATERIAIS E A INTERFACE COM A MEDICINA E BIOTECNOLOGIA

Os biomateriais são substâncias que foram projetadas para interagir com sistemas biológicos para fins médicos, seja para avaliar, tratar, aumentar ou substituir qualquer tecido, órgão ou função do corpo. Este campo evoluiu significativamente, passando do uso de materiais naturais minimamente processados para o desenvolvimento de materiais sintéticos e híbridos altamente sofisticados, projetados com funcionalidades específicas .As propriedades cruciais para um biomaterial incluem biocompatibilidade (a capacidade de desempenhar sua função desejada em relação a uma terapia médica, sem provocar efeitos locais ou sistêmicos indesejáveis no receptor dessa terapia, mas gerando a resposta benéfica mais apropriada em qualquer situação específica), biodegradabilidade (para aplicações temporárias onde o material deve ser gradualmente absorvido ou eliminado pelo corpo após cumprir sua função) e funcionalidade mecânica apropriada para a aplicação (por exemplo, resistência e elasticidade para um implante ósseo) .Os avanços em nanotecnologia, impressão 3D (permitindo a fabricação de estruturas personalizadas e complexas) e abordagens biomiméticas (que buscam imitar as estruturas e funções de materiais biológicos naturais) estão impulsionando inovações significativas em biomateriais . As aplicações incluem:

- Diagnóstico: agentes de contraste para Imagem por Ressonância Magnética (MRI) e biossensores para detecção sensível de doenças.
- Terapia**:** sistemas de liberação de fármacos (nano-carreadores), carreadores para terapia gênica e celular.
- Engenharia de Tecidos e Medicina Regenerativa: scaffolds (arcabouços) tridimensionais que suportam o crescimento celular e a regeneração de tecidos, como pele, osso, cartilagem e até órgãos mais complexos. Implantes médicos como próteses articulares, válvulas cardíacas, stents vasculares e implantes dentários.

Os desafios neste campo incluem a redução dos custos de produção, a garantia da segurança e eficácia a longo prazo dos biomateriais implantados, e a navegação pelo complexo cenário regulatório para aprovação de novos dispositivos e terapias. A sustentabilidade e o desenvolvimento de métodos de produção eco-amigáveis também são considerações cada vez mais importantes.

6.3. MATERIAIS INTELIGENTES E RESPONSIVOS (SMART MATERIALS)

Materiais inteligentes, também conhecidos como materiais responsivos ou adaptativos, são aqueles que possuem uma ou mais propriedades que podem ser significativamente alteradas de maneira controlada por estímulos externos. Esses estímulos podem ser de natureza física (temperatura, luz, pressão, campo elétrico ou magnético) ou química (pH, presença de certas moléculas). Uma classe importante são os materiais poliméricos anisotrópicos responsivos a estímulos (ASRPM), que possuem estruturas altamente ordenadas, resultando em propriedades que variam com a direção. Muitos desses materiais exibem capacidades de auto-regeneração (self-healing), onde danos microscópicos ou mesmo macroscópicos podem ser reparados autonomamente ou com um leve estímulo externo, prolongando a vida útil do material e mantendo sua integridade funcional. As aplicações dos materiais inteligentes são diversas e em expansão:

- Sensores: materiais que mudam de cor, condutividade elétrica ou outra

propriedade mensurável em resposta a um estímulo específico podem ser usados como sensores altamente sensíveis e seletivos.

- Atuadores: materiais que mudam de forma ou tamanho sob um estímulo podem atuar como músculos artificiais em dispositivos robóticos (especialmente em robótica macia), válvulas controláveis ou sistemas de liberação de fármacos ativados por estímulo.
- Biomimética e Engenharia Biomédica: materiais inteligentes que mimetizam as respostas adaptativas de sistemas biológicos são promissores para aplicações médicas, como tecidos artificiais responsivos ou sistemas de entrega de medicamentos que liberam o fármaco apenas no local e momento desejados.

6.4. MATERIAIS PARA ENERGIA SUSTENTÁVEL E DESAFIOS AMBIENTAIS

A transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis e a mitigação dos desafios ambientais dependem criticamente do desenvolvimento de novos materiais com desempenho, durabilidade e custo otimizados.

Para conversão de energia solar forma desenvolvidos materiais para células fotovoltaicas mais eficientes e baratas, incluindo silício cristalino, filmes finos (CdTe, CIGS), perovskitas e células solares orgânicas ou baseadas em pontos quânticos. Já para o armazenamento de energia, materiais avançados para eletrodos e eletrólitos em baterias (por exemplo, íon-lítio, e pesquisa em baterias de estado sólido, sódio-íon, lítio-enxofre, metal-ar) e supercapacitores, visando maior densidade de energia, vida útil mais longa e maior segurança. Materiais para armazenamento de hidrogênio.

Para células a combustível foram projetados materiais para membranas, catalisadores e eletrodos em células a combustível que convertem hidrogênio ou outros combustíveis diretamente em eletricidade com alta eficiência e baixas emissões; para usos termoelétricos, materiais capazes de converter calor residual em eletricidade (efeito Seebeck) ou de fornecer resfriamento/aquecimento direto (efeito Peltier).

Em termos de sustentabilidade e de tecnologias ecoamigáveis, como captura e conversão de carbono, foram produzidos materiais porosos como metal-organic frameworks (MOFs), zeólitas e carvões ativados para a captura seletiva de CO2 de gases de exaustão ou da atmosfera, e catalisadores para a conversão de CO2 em produtos químicos úteis ou combustíveis. É também o caso dos chamados materiais sustentáveis a partir do desenvolvimento de polímeros biodegradáveis, materiais de base biológica e processos de reciclagem mais eficientes para reduzir o impacto ambiental dos materiais ao longo de seu ciclo de vida.

7. O PAPEL DA MODELAGEM COMPUTACIONAL E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) NA DESCOBERTA DE NOVOS MATERIAIS

A complexidade e o vasto espaço de possibilidades no design de novos materiais tornam a abordagem puramente experimental lenta e cara. A modelagem computacional e, mais recentemente, a inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina (Machine Learning - ML) estão revolucionando a forma como os materiais são descobertos, compreendidos e otimizados.

Métodos computacionais tradicionais, como a Teoria do Funcional da Densidade (DFT), simulações de Monte Carlo e dinâmica molecular, são ferramentas fundamentais para calcular propriedades de materiais e simular seus comportamentos em escalas atômicas e moleculares. Esses métodos permitem explorar interações físicas e químicas com alta precisão, oferecendo uma base teórica sólida para o entendimento da estrutura e da dinâmica dos materiais. Combinadas, essas técnicas ajudam pesquisadores a prever características essenciais sem depender exclusivamente de experimentos laboratoriais.

Por outro lado, abordagens modernas como Inteligência Artificial e Machine Learning têm revolucionado a ciência dos materiais. Algoritmos de ML treinados em grandes conjuntos de dados permitem identificar padrões complexos, prever propriedades e otimizar composições para finalidades específicas. Tecnologias como triagem de alto rendimento e o design de materiais in silico aceleram o processo de descoberta, possibilitando a análise virtual de milhões de candidatos e a criação de materiais com propriedades desejadas antes mesmo da síntese laboratorial. Essa transformação tem levado a ciência de engenharia de materiais a um novo patamar, onde a computação atua de forma preditiva e estratégica.

A tabela a seguir visa classificar alguns dos materiais modernos e suas aplicações, ilustrando a amplitude do impacto da CEM contemporânea.

Tabela 2: Classificação e Aplicações de Materiais Modernos

Classe de Material	Exemplos Notáveis	Principais Aplicações Contemporâneas	Impacto Chave na Humanidade
Polímeros Avançados	Nylon, Teflon®, Policarbonato, PEEK (Poliéter éter cetona)	Vestuário técnico, utensílios antiaderentes, componentes automotivos e aeroespaciais, dispositivos médicos, embalagens avançadas	Melhoria do conforto, desempenho e segurança em produtos de consumo e industriais, facilitação de processos, novas funcionalidades
Semicondutores	Silício (Si), Arsenieto de Gálio (GaAs), Nitreto de Gálio (GaN)	Microeletrônica (processadores, memórias), optoeletrônica (LEDs, lasers), células solares, eletrônica de potência	Revolução digital, comunicações globais, iluminação eficiente, geração de energia renovável
Nanomateriais	Nanotubos de Carbono, Grafeno, Pontos Quânticos, Nanopartículas Metálicas	Eletrônica flexível, drug delivery, catálise, sensores de alta sensibilidade, compósitos de alto desempenho, revestimentos	Miniaturização de dispositivos, terapias médicas direcionadas, processos químicos mais eficientes, novas interfaces homem-máquina
Biomateriais	Hidroxiapatita, Titânio e suas ligas, Polímeros biodegradáveis (PLA, PLGA)	Implantes ósseos e dentários, próteses articulares, stents vasculares, scaffolds para engenharia de tecidos, sistemas de liberação de fármacos	Melhoria da qualidade de vida para pacientes com doenças ou lesões, regeneração de tecidos, terapias personalizadas
Materiais Inteligentes (Responsivos)	Polímeros responsivos a pH/temperatura, Ligas com memória de forma, Piezoelétricos	Sensores e atuadores, músculos artificiais, drug delivery inteligente, materiais auto-reparáveis, têxteis inteligentes	Automação e controle aprimorados, dispositivos adaptativos, aumento da durabilidade de produtos, novas interfaces interativas

Classe de Material	Exemplos Notáveis	Principais Aplicações Contemporâneas	Impacto Chave na Humanidade
Materiais para Energia Sustentável	Perovskitas, Materiais Termoelétricos, Eletrólitos de Estado Sólido, MOFs	Células solares de nova geração, conversão de calor residual em eletricidade, baterias mais seguras e eficientes, captura de CO_2	Transição para fontes de energia limpa, aumento da eficiência energética, mitigação das mudanças climáticas
Compósitos Avançados	Fibra de Carbono/Epóxi, Compósitos de Matriz Cerâmica (CMCs), Compósitos de Matriz Metálica (MMCs)	Estruturas aeroespaciais e automotivas leves, equipamentos esportivos de alto desempenho, componentes de turbinas a gás	Veículos mais leves e eficientes em termos de combustível, maior desempenho e durabilidade em condições extremas, novas possibilidades de design estrutural

As fronteiras atuais da CEM indicam uma forte convergência para o desenvolvimento de materiais que não apenas se destacam em uma única propriedade, mas que integram múltiplas funcionalidades. Pense, por exemplo, em um biomaterial que seja simultaneamente biocompatível, biodegradável, capaz de liberar fármacos de forma controlada e, talvez, de sinalizar seu estado de degradação. Ou em um material para aplicação energética que seja altamente eficiente na conversão de luz solar, fabricado a partir de elementos abundantes e não tóxicos, e que seja estável por longos períodos. A sustentabilidade, abrangendo todo o ciclo de vida do material – desde a extração de matérias-primas, passando pelo processamento e uso, até o descarte ou reciclagem – tornou-se uma consideração central e inadiável no design de novos materiais. A capacidade de projetar materiais *in silico*, utilizando ferramentas de IA e modelagem computacional para prever e otimizar propriedades antes mesmo da síntese experimental está permitindo que os cientistas abordem esses desafios complexos de forma mais direcionada e eficiente. O futuro da CEM aponta, portanto, para a criação de "sistemas materiais" intrinsecamente multifuncionais, inteligentes e concebidos com a sustentabilidade como um requisito fundamental, capacitando a humanidade a enfrentar os grandes desafios globais através da engenharia da matéria em seu nível mais fundamental.

8. CONCLUSÃO

A história da Ciência e Engenharia de Materiais é uma narrativa épica da engenhosidade humana e de sua busca incessante por compreender, manipular e criar a substância do mundo ao seu redor. Desde o uso empírico de pedras e fibras pelas primeiras comunidades humanas, passando pelos estudos sistemáticos pioneiros de figuras como Georgius Agricola sobre metais e minerais e impulsionada pelas revoluções Científica e Industrial que desvendaram as propriedades fundamentais da matéria e permitiram sua produção em massa a CEM evoluiu para uma disciplina científica sofisticada e indispensável no século XX. A formalização acadêmica deste campo, integrando conhecimentos da física, química e engenharia abriu caminho para o desenvolvimento de classes de materiais inteiramente novas – polímeros sintéticos, semicondutores, cerâmicas avançadas, compósitos – que definiram a tecnologia e o modo de vida modernos. Hoje, a CEM continua a expandir suas fronteiras com os nanomateriais, biomateriais, materiais inteligentes e aqueles projetados para um futuro sustentável, utilizando ferramentas avançadas de modelagem computacional e inteligência artificial.

O papel central e transformador da CEM no progresso humano e na melhoria da qualidade de vida é inegável. Cada avanço significativo em materiais – da pedra lascada ao silício ultrapuro dos microchips, do barro cozido aos polímeros biocompatíveis – tem sido um motor para o desenvolvimento tecnológico, econômico e social. Na construção, permitiu abrigos mais seguros e cidades mais resilientes; nos transportes, encurtou distâncias e conectou o mundo; na medicina, salvou vidas e aliviou o sofrimento; nas comunicações, possibilitou a era da informação global; e na energia, forneceu os meios para aproveitar e converter os recursos naturais. Esses impactos traduziram-se diretamente em melhorias na saúde, no conforto, na segurança, na educação e na capacidade humana de moldar seu próprio destino.

Olhando para o futuro, a necessidade de inovação em materiais permanece mais premente do que nunca. Os grandes desafios do século XXI – a crise climática, a transição para uma economia de baixo carbono, a demanda por cuidados de saúde mais eficazes e personalizados, a gestão sustentável dos recursos naturais e a mitigação da poluição – todos exigem soluções que, em sua essência, dependem do desenvolvimento de novos e melhores materiais. A CEM está na vanguarda dessa busca, com pesquisas focadas em materiais para captura e armazenamento de energia renovável, baterias de próxima geração, plásticos biodegradáveis e de base biológica, terapias médicas regenerativas, sistemas de purificação de água e ar, e materiais com ciclos de vida circulares.

A trajetória da CEM demonstra uma evolução de uma prática empírica para uma ciência fundamental e, cada vez mais, para uma disciplina de design proativo. A capacidade de projetar materiais com funcionalidades específicas em nível molecular e atômico, auxiliada por IA e modelagem avançada, juntamente com uma crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental, posiciona a Ciência e Engenharia de Materiais não apenas como um campo de pesquisa fascinante, mas como uma metadisciplina essencial. Ela é fundamental para sintetizar conhecimentos de diversas áreas e traduzi-los em soluções tangíveis para os problemas mais complexos que a humanidade enfrenta. O legado da CEM é, portanto, um legado de capacitação contínua, e seu futuro promete ser ainda mais impactante na construção de um mundo mais sustentável, saudável e próspero.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

[1] AMERICAN ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES. **On the evolving curriculum in materials science & engineering**. Dædalus, [s. l.], v. 134, n. 2, 2005. Disponível em: https://www.amacad.org/publication/daedalus/evolving-curriculum-materials-science-engineering. Acesso em: 29 jul. 2025.

[2] AUTODESK. **History of composite materials**: From 7000 BCE to today. Autodesk Design & Make, 13 jan. 2022. Disponível em: https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-composite-materials. Acesso em: 29 jul. 2025.

[3] BURFORD, R. Polymers: a historical perspective. **Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales**, [s. l.], v. 152, n. 2, p. 186-206, 2019. Disponível em: https://www.royalsoc.org.au/wp-content/uploads/2019/10/152-2-06Burford.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[4] CADERNOS DO ARQUIVO MUNICIPAL. **A descoberta e transformação dos materiais**. Câmara Municipal de Lisboa, 10 dez. 2021. Disponível em: https://cadernosarquivo.cm-lisboa.pt/index.php/am/article/download/27/12/13. Acesso em: 29 jul. 2025.

[5] CASA DE OSWALDO CRUZ, FIOCRUZ. **Orientações para citações e referências**: Norma APA (American Psychological Association). Rio de Janeiro: Fiocruz, jun. 2021. Disponível em: https://www.coc.fiocruz.br/images/PDF/orientacoes_APA.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[6] EBSCO. **Réaumur Discovers Carbon's Role in Hardening Steel**. EBSCO Research Starters, 27 abr. 2024. Disponível em: https://www.ebsco.com/research-starters/history/reaumur-discovers-carbons-role-hardening-steel. Acesso em: 29 jul. 2025.

[7] ESCOLA BRASILEIRA DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS, FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Normas da American Psychological Association (APA) para trabalhos acadêmicos**. Rio de Janeiro: FGV, dez. 2018. Disponível em: https://ebape.fgv.br/sites/default/files/paginas/dez/18/apa_portugues.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[8] FRONTIERS IN MATERIALS. **Anisotropic stimuli-responsive polymeric materials**: chemistry and applications. Frontiers, 13 mar. 2025. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2025.1533330/full. Acesso em: 29 jul. 2025.

[9] FRONTIERS RESEARCH TOPIC. **Advanced Functional Materials for Disease Diagnosis, Drug Delivery and Tissue Repair**. Frontiers, 11 abr. 2025. Disponível em: https://www.frontiersin.org/research-topics/62329/advanced-functional-materials-for-disease-diagnosis-drug-delivery-and-tissue-repair/magazine. Acesso em: 29 jul. 2025.

[10] HOWSTUFFWORKS. **Metallurgy**: The Study of Metals and Their Properties. HowStuffWorks, 18 jul. 2023. Disponível em: https://science.howstuffworks.com/metallurgy.htm. Acesso em: 29 jul. 2025.

[11] INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL SCIENCES (ICTS). **Chladni Plate**. [S. l.]: ICTS, [s.d.]. Disponível em: https://www.icts.res.in/lab/CP. Acesso em: 29 jul. 2025.

[12] PUBLICAÇÕES ACS. **Nanoscience in Action**: Unveiling Emerging Trends in Materials and Applications. ACS Omega, 17 fev. 2025. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c10929. Acesso em: 29 jul. 2025.

[13] RESOLVEMASS LABORATORIES INC. **A Brief History of Polymer Synthesis**: Key Milestones. [S. l.]: ResolveMASS Laboratories, [s.d.]. Disponível em: https://resolvemass.ca/a-brief-history-of-polymer-synthesis-key-milestones. Acesso em: 29 jul. 2025.

[14] ROBERTAZZI, A. **Machine Learning in Materials Science**: A Second Computational Revolution? From Atoms To Words, 8 jan. 2024. Disponível em: https://www.arturorobertazzi.it/2024/01/machine-learning-in-materials-science-a-second-computational-revolution/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[15] ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. **Bridging current and future innovations to unlock the potential of multifunctional materials for sustainable energy applications**. Materials Advances, 12 maio 2025. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ma/d5ma00102a. Acesso em: 29 jul. 2025.

[16] SCIENCE LEARNING HUB – POKAPŪ AKORANGA PŪTAIAO. **Advanced ceramics – timeline**. [S. l.]: Science Learning Hub, 22 abr. 2014. Disponível em: https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1793-advanced-ceramics-timeline. Acesso em: 29 jul. 2025.

[17] SCIENCE MUSEUM. **The New Science**: 1550–1800. [S. l.]: Science Museum, 9 ago. 2019. Disponível em: https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/new-science-1550-1800. Acesso em: 29 jul. 2025.

[18] TAYLOR & FRANCIS ONLINE. **Advancements and Challenges in Biomaterials**: Innovations, Sustainability, and Future Prospects. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 13 set. 2023. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00222348.2025.2476852?src=. Acesso em: 29 jul. 2025.

[19] TOKYO ELECTRON LTD. **The history of Semiconductor**. Nanotec Museum, [s.d.]. Disponível em: https://www.tel.com/museum/exhibition/history/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[20] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA (UEPG). **Engenharia e Ciência de Materiais**. Ponta Grossa: UEPG, [s.d.]. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=qyOaCBIPGPM.

[21] UNIVERSIDADE FEEVALE. **A Evolução dos Materiais e suas Aplicações**. [S. l.]: Universidade Feevale, 2 jun. 2006. Disponível em: https://www.feevale.br/site/files/documentos/pdf/32246.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

[22] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: USP, [s.d.]. Disponível em: https://www.prpg.usp.br/pt-br/faca-pos-na-usp/programas-de-pos-graduacao/91-ciencia-e-engenharia-de-materiais. Acesso em: 29 jul. 2025.

[23] WIKIPEDIA. **History of glass**. Wikimedia Foundation, 13 abr. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_glass. Acesso em: 29 jul. 2025.

[24] WIKIPEDIA. **History of materials science**. Wikimedia Foundation, 29 abr. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_materials_science. Acesso em: 29 jul. 2025.

[25] WIKIPEDIA. **Materials science**. Wikimedia Foundation, [s.d.]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Materials_science. Acesso em: 29 jul. 2025.

CAPÍTULO

04 Materiais e ambiente

Resumo: A intrínseca relação entre materiais e meio ambiente envolve a investigação dos impactos ambientais desde a extração, produção, uso e descarte de materiais, fomentando a discussão sobre práticas sustentáveis na gestão de recursos1. O ambiente, com seus agentes físicos, químicos e biológicos, molda e transforma os materiais, enquanto a extração, o processamento, o uso e o descarte destes imprimem uma marca indelével no planeta2. A busca pela sustentabilidade na gestão de materiais tornou-se uma prioridade global, impulsionando a internalização de práticas como a redução do consumo na fonte, o prolongamento da vida útil de produtos através da reutilização, a reinserção de materiais no ciclo produtivo por meio da reciclagem e a recuperação energética de resíduos não recicláveis3. A conscientização e a educação são pilares indispensáveis para a promoção efetiva da sustentabilidade na gestão de materiais, tornando-se imperativo que a sociedade desenvolva uma compreensão aprofundada dos multifacetados impactos ambientais inerentes ao ciclo de vida dos materiais4.

1. APRESENTAÇÃO

Em *Materiais e Ambiente*, obra de minha autoria publicada em 2001, embora contextualizada no início do século XXI e que, em minha avaliação, mantém sua relevância ao explorar a intrínseca relação entre materiais e meio ambiente, investiga-se os impactos ambientais decorrentes da extração, produção, uso e descarte de materiais, fomentando a discussão sobre práticas sustentáveis na gestão de recursos. Ao refletir as preocupações ambientais da época, a obra ainda oferece um panorama valioso sobre a evolução do debate acerca da sustentabilidade, tema cada vez mais central na sociedade contemporânea. Vinte e quatro anos depois, retomo esta temática para introduzir esta seção do livro que aborda trabalhos que desenvolvi enfocando a evolução conjunta de materiais e da humanidade, bem como a ação do ambiente sobre os materiais.

A relação entre materiais e o ambiente configura um intrincado jogo de influências mútuas. O ambiente, com sua diversidade de agentes físicos, químicos e biológicos, molda e transforma os materiais, enquanto a extração, o processamento, o uso e o descarte destes imprimem uma marca indelével no planeta.

2. A AÇÃO DO AMBIENTE SOBRE OS MATERIAIS

O ambiente exerce uma influência significativa sobre os materiais, manifestando-se de diversas maneiras que induzem processos de alteração em suas propriedades, culminando, em muitos casos, na sua degradação. Essa interação complexa entre o material e o meio circundante configura-se como um campo de estudo multidisciplinar, de importância fundamental para a engenharia de materiais, a conservação e a durabilidade de produtos e estruturas.

A corrosão, um dos processos de degradação mais relevantes, especialmente para materiais metálicos, é definida como a deterioração de um material, geralmente um metal, por reação eletroquímica com o ambiente [1]. A presença de agentes como água, oxigênio, dióxido de carbono, poluentes atmosféricos e sais [2] acelera as reações anódicas e catódicas na superfície do metal, resultando na formação de óxidos, hidróxidos e outros compostos que comprometem a integridade estrutural e funcional do material. Diferentes tipologias de corrosão podem ocorrer, incluindo a corrosão uniforme, a corrosão por pites, a corrosão galvânica e a corrosão sob tensão, cada qual apresentando mecanismos e consequências distintos [3].

Em contrapartida, a degradação polimérica envolve a quebra das longas cadeias moleculares que constituem os polímeros, levando à alteração de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Fatores ambientais como a radiação ultravioleta [UV], o calor, a umidade, o oxigênio e a poluição atmosférica são os principais desencadeadores desse processo [3,4 A radiação UV, por exemplo, pode iniciar reações de fotodegradação, quebrando ligações químicas e gerando radicais livres que propagam a degradação. As pesquisas de Navarro [5,6] aprofundam a compreensão dos mecanismos de degradação de polímeros, investigando a influência dos parâmetros de exposição, como intensidade da radiação e tempo de exposição, na deterioração desses materiais, bem como o desenvolvimento de estratégias de estabilização e proteção [5,6].

O desgaste representa outro mecanismo fundamental de degradação, caracterizado pela perda progressiva de material da superfície sólida devido à ação mecânica. Esse fenômeno abrange diferentes modalidades, como o atrito [movimento relativo entre superfícies em contato], a erosão [impacto de partículas sólidas, líquidas ou

gasosas] e a abrasão [riscamento ou corte por partículas duras]. A resistência ao desgaste é um fator crítico no desempenho e na vida útil de componentes em diversas aplicações de engenharia, incluindo engrenagens, rolamentos, ferramentas de corte e revestimentos protetores [7,8]. A seleção de materiais com elevada dureza, tenacidade e coeficiente de atrito adequado, bem como o projeto de superfícies com acabamento e lubrificação apropriados, são essenciais para mitigar os efeitos do desgaste.

Ademais, os materiais também estão suscetíveis à influência de microrganismos, como bactérias, fungos e algas, que podem induzir a biodeterioração. Esse processo é particularmente relevante em materiais orgânicos, como madeira, couro, têxteis, tintas e polímeros naturais [9-11]. Os microrganismos podem colonizar a superfície do material, secretar enzimas que degradam seus componentes, formar biofilmes que retêm umidade e promovem a corrosão, e gerar subprodutos metabólicos que alteram as propriedades do material. A biodeterioração pode resultar em perda de resistência mecânica, manchas, odores desagradáveis e falhas funcionais, demandando a implementação de estratégias de biocidas, revestimentos antimicrobianos e controle das condições ambientais para a preservação dos materiais.

A interação entre os materiais e o ambiente configura-se como um processo dinâmico e complexo, envolvendo múltiplos mecanismos de degradação que podem ocorrer de forma isolada ou sinérgica. A compreensão aprofundada desses processos é fundamental para a seleção adequada de materiais para diferentes aplicações, para o desenvolvimento de estratégias de proteção e conservação eficazes e para a previsão da vida útil de componentes e estruturas expostas a diversas condições ambientais. O avanço nas pesquisas em ciência e engenharia de materiais continua a fornecer novas perspectivas e soluções para mitigar os efeitos adversos do ambiente sobre os materiais, buscando aumentar sua durabilidade e sustentabilidade.

3. O IMPACTO DOS MATERIAIS SOBRE O AMBIENTE

A vasta cadeia de produção e consumo de materiais, desde a obtenção da matéria-prima até o descarte final, imprime uma significativa pegada ambiental. A fase inicial, de extração de recursos naturais como minérios, petróleo e madeira, frequentemente desencadeia o desmatamento de extensas áreas, a fragmentação e destruição de habitats naturais cruciais para a biodiversidade, a contaminação de corpos d'água por sedimentos e produtos químicos, e a expressiva emissão de gases de efeito estufa, intensificando as mudanças climáticas [12]. A atividade de mineração, em particular, é notória pela geração de grandes volumes de rejeitos, os quais, se não gerenciados de forma rigorosa, representam um grave risco de contaminação do solo e de recursos hídricos por metais pesados e outras substâncias tóxicas [13,14].

A etapa subsequente, o processamento industrial dos materiais, configura-se como uma fonte considerável de poluição atmosférica e hídrica, além da produção de resíduos classificados como perigosos [15]. Indústrias do setor químico, por exemplo, liberam para a atmosfera poluentes como óxidos de nitrogênio [NOx] e dióxido de enxofre [SO2], precursores da chuva ácida e responsáveis por diversos problemas de saúde respiratória [16]. Similarmente, a produção em larga escala de aço e alumínio gera quantidades significativas de escória e lama vermelha, subprodutos que demandam um gerenciamento cuidadoso para evitar a contaminação do solo e da água [17]. Adicionalmente, o consumo energético intensivo dessas indústrias contribui para as emissões de gases de efeito estufa, ampliando o impacto ambiental [18].

A fase de utilização dos materiais, especialmente daqueles com baixa ou nenhuma biodegradabilidade, agrava o problema do acúmulo de lixo e da poluição visual em áreas urbanas e naturais. Os plásticos, amplamente utilizados em diversas aplicações devido à sua durabilidade e baixo custo, representam um desafio ambiental significativo, pois sua decomposição pode levar séculos, resultando em um crescente volume de resíduos em aterros sanitários saturados e na poluição de ecossistemas marinhos, com graves consequências para a vida aquática [19,20]. O descarte inadequado de resíduos específicos, como o lixo eletrônico [e-lixo], é particularmente preocupante devido à presença de metais pesados e outras substâncias perigosas, como chumbo, mercúrio e cádmio, que podem se infiltrar no solo e contaminar lençóis freáticos, representando um risco à saúde humana e ao meio ambiente [21-23]. A crescente geração de e-lixo, impulsionada pela rápida obsolescência de equipamentos eletrônicos, exige sistemas de coleta e reciclagem eficientes para mitigar seus impactos negativos [24].

O ciclo de vida dos materiais, desde a sua origem até o seu descarte, é intrinsecamente ligado a uma série de impactos ambientais complexos e interconectados. A busca por alternativas mais sustentáveis, a implementação de práticas de produção e consumo mais conscientes, e o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e reaproveitamento eficientes são cruciais para minimizar a pressão sobre os recursos naturais e reduzir a degradação ambiental associada aos materiais.

4. A BUSCA PELA SUSTENTABILIDADE

Confrontados com a magnitude dos desafios ambientais decorrentes da produção e do consumo de materiais, a busca pela sustentabilidade na sua gestão ascendeu à condição de prioridade global. A internalização de práticas como a redução do consumo na fonte, o prolongamento da vida útil de produtos através da reutilização, a reinserção de materiais no ciclo produtivo por meio da reciclagem e a recuperação energética de resíduos não recicláveis configuram-se como estratégias cruciais para a atenuação dos impactos ambientais negativos [25]. Nesse contexto, a economia circular emerge como um modelo sistêmico promissor para a sustentabilidade, preconizando a manutenção dos materiais em um ciclo fechado, minimizando a extração de novos recursos e evitando o descarte em aterros sanitários [26]. Este modelo engloba desde o design de produtos para durabilidade e reparabilidade até a implementação de sistemas eficientes de coleta e processamento de resíduos [27].

Ademais, o avanço e a implementação de materiais intrinsecamente mais sustentáveis representam um pilar fundamental na transição para uma economia mais verde. O desenvolvimento e a aplicação de biopolímeros, derivados de fontes renováveis como plantas e microrganismos, os compósitos reforçados com fibras naturais, como bambu e sisal, e a crescente utilização de materiais reciclados em novas aplicações são cruciais para a redução da dependência de recursos naturais não renováveis e para a minimização dos impactos ambientais associados à extração e ao processamento de materiais convencionais [28,29]. A nanotecnologia, por sua vez, oferece um vasto leque de oportunidades para a concepção e produção de materiais com propriedades aprimoradas, como maior resistência, menor peso e funcionalidades inovadoras, concomitantemente com um menor impacto ambiental em seu ciclo de vida [30,31]. A aplicação da química verde no design de materiais e processos também se mostra essencial para a prevenção da poluição e a criação de alternativas mais seguras e ecologicamente benignas [32].

A trajetória rumo à sustentabilidade na gestão de materiais demanda uma abordagem multifacetada, que integra a otimização do uso dos recursos existentes, a inovação no desenvolvimento de materiais com menor pegada ambiental e a transição para modelos econômicos circulares. A colaboração entre governos, indústria, academia e sociedade civil é imprescindível para impulsionar essa transformação e construir um futuro mais resiliente e ambientalmente equilibrado [33].

5. A IMPORTÂNCIA FUNDAMENTAL DA CONSCIENTIZAÇÃO E DA EDUCAÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE NA GESTÃO DE MATERIAIS

A conscientização e a educação emergem como pilares estruturantes e indispensáveis para a efetiva promoção da sustentabilidade na intrincada gestão de materiais. Em um cenário global marcado por crescentes desafios ambientais, torna-se não apenas relevante, mas imperativo, que a sociedade em sua totalidade desenvolva uma compreensão aprofundada acerca dos multifacetados impactos ambientais inerentes ao ciclo de vida dos materiais. Essa compreensão deve transcender a mera percepção superficial, abrangendo desde a exaustiva extração de recursos naturais até as complexas dinâmicas de descarte e seus efeitos a longo prazo nos ecossistemas terrestres e aquáticos [34]. A internalização de práticas de consumo mais ponderadas e de descarte ambientalmente responsáveis, por sua vez, depende intrinsecamente do nível de informação e da mudança de comportamento individual e coletivo [35].

Nesse contexto, a educação ambiental, formal e não formal, assume um papel axial na formação de cidadãos genuinamente conscientes e ativamente engajados na imperiosa tarefa de preservação do planeta para as presentes e futuras gerações [36]. Desde os primeiros anos escolares até os níveis mais avançados da educação universitária e profissional, a disseminação de conhecimentos sólidos sobre os processos ecológicos, os impactos da atividade humana e as alternativas sustentáveis configura-se como um investimento estratégico de longo prazo. Currículos educacionais que incorporem de forma transversal a temática da sustentabilidade, abordando desde a origem dos materiais até as implicações de seu descarte inadequado, são fundamentais para construir uma cultura de responsabilidade ambiental [37]. Além disso, iniciativas de educação ambiental não formal, como workshops, campanhas de sensibilização e atividades de extensão comunitária, desempenham um papel complementar fundamental ao alcançar um público mais amplo e diversificado [38].

As pesquisas pioneiras e aprofundadas do renomado pesquisador Navarro [5, 6, 39] oferecem uma contribuição inestimável para a compreensão da degradação de polímeros, um aspecto central na mitigação do impacto ambiental dos materiais sintéticos, amplamente utilizados na sociedade contemporânea. Suas obras desvendam os intrincados mecanismos pelos quais os polímeros se decompõem sob a influência de diversos fatores ambientais, como radiação ultravioleta, oxigênio, umidade e a ação de microrganismos. Ao elucidar os fatores que aceleram ou retardam essa degradação, Navarro e outros pesquisadores da área fornecem *insights* valiosos para o desenvolvimento de materiais poliméricos mais duráveis, recicláveis ou biodegradáveis, bem como para a otimização de estratégias de gestão de resíduos plásticos [40,41]. A compreensão detalhada dos processos de degradação é, portanto, fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem mais eficientes, para a compostagem de bioplásticos e para a prevenção da persistência de microplásticos em ambientes naturais [42].

A conscientização, impulsionada por uma educação ambiental robusta e continuada, capacita os indivíduos a tomarem decisões de consumo mais informadas e a adotarem práticas cotidianas mais sustentáveis. Isso inclui a preferência por produtos com menor pegada ambiental, a redução do consumo supérfluo, a prática da reutilização de bens e embalagens, a separação correta de resíduos para a reciclagem e o engajamento em iniciativas comunitárias voltadas para a sustentabilidade [43]. Além disso, cidadãos conscientes tornam-se mais propensos a exigir políticas públicas e práticas empresariais que priorizem a sustentabilidade na gestão de materiais, exercendo assim uma pressão positiva por mudanças sistêmicas em direção a uma economia mais circular e de baixo carbono [44].

A conscientização e a educação não são meros complementos na busca pela sustentabilidade na gestão de materiais, mas sim a própria base sobre a qual se constroem as mudanças de comportamento, as inovações tecnológicas e as políticas públicas eficazes. Investir na educação ambiental em todos os níveis e promover a disseminação de informações precisas e acessíveis sobre os impactos dos materiais e as alternativas sustentáveis é um passo fundamental para garantir um futuro onde a produção e o consumo de bens coexistam de forma harmoniosa com a saúde do planeta.

REFERÊNCIAS

[1] ROBERGE, P. R. *Handbook of corrosion engineering*. McGraw Hill Professional, 2018.

[2] GENTIL, V. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

[3] JONES, D. A. Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall, 1996.

[4] RABELLO, M. S., Tese de Doutorado, New Castle UponTyne, 1996.

[5] NAVARRO, R.F. Avaliação dos Efeitos isolados e combinados dos parâmetros de exposição sobre a degradação do polipropileno e do compósito poliprpileno/fibra de vidro. 2002. Tese [Doutorado em Engenharia de Materiais] - UFCG, Campina Grande, 2002.

[6] NAVARRO, R.F. Aspectos da Degradação de Polímeros. Editora da UFCG, 2009.

[7] BLAU, P. J. Friction science and technology: from concepts to applications. CRC Press, 2001.

[8] HUTCHINGS, I. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann, 1992.

[9] GAYLARDE, C. C.; VIDELA, H. A. Biodeterioration of materials—fundamental aspects. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 55, n. 3, p. 151-159, 2005.

[10] VIDELA, H. A. *Manual de corrosión y biodeterioro*. Madrid: Síntesis, 1996.

[11] VIDELA, H. A. *Manual of biocorrosion*. CRC press, 1996.

[12] YOUNG, J. E. *Mining the earth*. Worldwatch Institute, 1992. [Worldwatch Paper, 109].

[13] VEIGA, M. M. Guidelines for environmental management of artisanal and small-scale gold mining. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, 2003.

[14] BRASIL ESCOLA. Rejeitos da mineração. [S. l.], 2023. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/rejeitos-mineracao.htm. Acesso em: 9 abr. 2025.

[15] CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2019*. São Paulo, 2020.

[16] SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2006.

[17] HABASHI, F. Extractive metallurgy today. *Journal of materials processing technology*, v. 72, n. 1, p. 108-115, 1997.

[18] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2021.

[19] THOMPSON, R. C.; SWAN, S. H.; MOORE, C. J.; VOM SAAL, F. S. Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 1973-1976, 2009.

[20] GESAMP - Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment*. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/UNEP/UNITAR/UNU, 2015. [GESAMP Reports and Studies, no. 90].

[21] WIDMER, R. *et al*. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 436-458, 2005.

[22] MMA - Ministério do Meio Ambiente. Lixo Eletrônico. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/lixo-eletronico. Acesso em: 9 abr. 2025.

[23] VERTOWN. O que é lixo eletrônico? Tudo sobre e-waste. [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.vertown.com.br/blog/o-que-e-lixo-eletronico/. Acesso em: 9 abr. 2025.

[24] BALDÉ, C. P. *et al*. *The global e-waste monitor 2014: Quantities, transboundary flows, waste treatment*. United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, 2015.

[25] AYRES, R. U.; AYRES, L. W. *Industrial ecology: towards a sustainable economy*. Prentice Hall, 1996.

[26] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation, 2013.

[27] STAHEL, W. R. *The circular economy: A user's guide*. Routledge, 2019.

[28] ASHBY, M. F. *Materials and sustainable development*. Butterworth-Heinemann, 2012.

[29] MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 287, n. 1, p. 1-14, 2002.

[30] ROCO, M. C. Broader societal issues of nanotechnology: Challenges and responsibilities. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 5, n. 3-4, p. 181-189, 2003.

[31] RIEGO-SINTES, J. *et al*. Nano-engineered materials for environmental applications. *Journal of Materials Chemistry*, v. 18, n. 25, p. 2727-2746, 2008.

[32] ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. *Green chemistry: theory and practice*. Oxford University Press, 1998.

[33] UNEP - United Nations Environment Programme. *Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication*. 2011.

[34] HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, L. H. *Natural capitalism: creating the next industrial revolution*. Little, Brown and Company, 1999.

[35] GARDNER, G. T.; STERN, P. C. *Environmental problems and human behavior*. 2. ed. Allyn and Bacon, 2002.

[36] TILBURY, D. Environmental education for sustainability: defining the new focus for environmental education in the 1990s. *Connect*, v. 20, n. 1, p. 3-11, 1995.

[37] PALMER, J. A. *Environmental education in the 21st century: theory, practice, promise and dilemma*. Routledge, 1998.

[38] FINGER, M. From knowledge to action? Exploring the relationships between environmental experiences, learning and behaviour. *The Journal of Social Issues*, v. 50, n. 3, p. 141-160, 1994.

[39] NAVARRO, R. F. Materiais e Ambiente, Editora da UFPB, 2001.

[40] ALBERTSSON, A.-C.; KARLSSON, S.; LINDENSTRÖM, T. Biodegradation of plastics. *Polymer Degradation and Stability*, v. 18, n. 1, p. 73-89, 1987.

[41] ANDRADY, A. L. *Plastics and environmental sustainability*. John Wiley & Sons, 2011.

[42] KOELMANS, A. A. Microplastics in the aquatic environment: critical review of sources, occurrence, effects, fate and behaviour. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 21, p. 12975-12988, 2015.

[43] MCKENZIE-MOHR, D. *Fostering sustainable behavior: An introduction to community-based social marketing*. New Society Publishers, 2000.

[44] JACOBSON, M. Z. *et al*. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight [WWS] all-sector energy roadmaps for the 50 United States. *Energy and Environmental Science*, v. 8, n. 7, p. 2093-2117, 2015.

CAPÍTULO

05 A evolução dos cursos de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil: panorama histórico, desafios e perspectivas de mercado

Resumo: A Engenharia de Materiais constitui um campo multidisciplinar de importância estratégica para o desenvolvimento tecnológico, econômico e social do Brasil. Sua atuação abrange a síntese, o processamento, o desenvolvimento e a aplicação de materiais, cobrindo o ciclo de vida completo de um produto, desde a seleção das matérias-primas até o controle de qualidade e a reciclagem. A engenharia, de modo geral, é um vetor fundamental para o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e para o fomento da inovação em diversas cadeias produtivas. A versatilidade do engenheiro de materiais permite sua inserção tanto em setores industriais consolidados, como metalurgia, cerâmica e polímeros, quanto em áreas emergentes e de alta tecnologia, como biomateriais, nanotecnologia e materiais inteligentes, demonstrando a adaptabilidade e a relevância contínua da profissão frente às novas demandas do mercado.

O presente capítulo tem como objetivo analisar a trajetória histórica da criação e evolução dos cursos de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil. Será detalhado o panorama atual desses cursos, incluindo seu número, distribuição geográfica por unidade federativa e a predominância de instituições públicas ou privadas. Uma avaliação crítica será realizada sobre as vantagens e desvantagens decorrentes do aumento do número de cursos na área. Por fim, será discutida a complexa relação entre a formação de profissionais e as demandas do mercado de trabalho, abordando os desafios de ocupação de vagas e as perspectivas de inserção profissional.

1. PERFIL DO ENGENHEIRO DE MATERIAIS

O engenheiro de materiais é um profissional multidisciplinar, cuja atuação abrange a síntese, o processamento e o desenvolvimento de materiais. Ele trabalha de forma integrada com outras engenharias e áreas do conhecimento no desenvolvimento de projetos e pesquisas. Seu perfil profissional abrange desde a seleção da matéria-prima e métodos de produção até a realização dos testes de controle de qualidade do produto.

As áreas de atuação são diversas, incluindo a gestão e supervisão técnica de projetos e processos de produção, transformação e uso de materiais. Isso compreende todo o processo produtivo, desde a seleção das matérias-primas, a definição dos métodos mais apropriados para a produção do produto final, até a especificação do uso mais adequado desse produto. O profissional também realiza estudos, ensaios e avaliações de materiais com o objetivo de minimizar custos, garantir a qualidade do produto final e possibilitar a reciclagem.

O campo de atuação para este profissional é amplo, incluindo indústrias petroquímicas, siderúrgicas e metalúrgicas, automobilística, de transformação de polímeros, no setor de reciclagem de materiais, e em empresas de cimento, vidro e cerâmicas. Setores como o petroquímico e o siderúrgico são os que mais contratam engenheiros de materiais. Além disso, devido à sua sólida base em matemática e capacidade de resolver problemas, engenheiros de materiais também são valorizados no setor financeiro, sendo procurados por bancos e empresas. A profissão é regulamentada no Brasil, exigindo que o profissional obtenha registro junto ao Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CREA) do estado onde atua.

2. DEMANDA E EMPREGABILIDADE

O mercado de trabalho para engenheiros de materiais é vasto e oferece diversas oportunidades em vários setores da indústria, abrangendo as três principais áreas de sua formação: metais, cerâmicos e polímeros. Empresas de embalagens, aeronáutica, naval, e até mesmo na área da saúde (desenvolvimento de próteses) são potenciais empregadoras.

Um estudo da Associação Brasileira de Mantenedoras de Ensino Superior (Abmes) indicou que cerca de 77% dos profissionais de engenharia conseguiram emprego logo após a formatura, colocando os cursos de engenharia em segundo lugar entre as áreas com mais oportunidades no Brasil, atrás apenas dos profissionais de TI. No entanto, esta estatística geral para engenharia precisa ser contextualizada com a discussão sobre a qualidade da formação.

Apesar da ampla aceitação do engenheiro de materiais no mercado devido ao seu perfil flexível e interdisciplinar, o mercado de trabalho enfrenta a complexidade de um "déficit" de 75 mil engenheiros, conforme levantamento da Confederação Nacional da Indústria (CNI) de 2023. Este déficit, como discutido anteriormente, não se refere à quantidade de graduados, mas sim à qualidade e adequação da formação para as demandas específicas da indústria.

3. DESAFIOS DE INSERÇÃO E PERSPECTIVAS

A inserção de engenheiros de materiais no mercado de trabalho brasileiro apresenta desafios significativos, mas também um vasto leque de oportunidades. A raiz de muitos desses obstáculos reside, em grande parte, na qualidade da formação oferecida

por uma parcela considerável das instituições de ensino superior no Brasil. A deficiência educacional em muitas universidades e faculdades resulta em profissionais que, ao ingressarem no mercado, podem não possuir as qualificações e habilidades necessárias para atender às demandas rigorosas da indústria. Isso ressalta a urgência de uma revisão e aprimoramento contínuo dos currículos e metodologias de ensino.

3.1. ESTRATÉGIAS PARA SUPERAR OS DESAFIOS E FORTALECER A ÁREA DE MATERIAIS

Para suavizar esses desafios e fortalecer a área de Materiais no país, diversas estratégias são essenciais. É fundamental fomentar a produção intelectual discente em coautoria com docentes, estimulando a pesquisa e a inovação desde a graduação. A inclusão de jovens pesquisadores nos quadros de docentes permanentes é crucial para renovar e oxigenar o corpo docente, garantindo a perpetuação do conhecimento e a atualização das práticas de ensino. Além disso, a manutenção de infraestrutura moderna de equipamentos e laboratórios é indispensável para que os estudantes tenham acesso a ferramentas de ponta, essenciais para a formação prática.

O estabelecimento de convênios com centros de excelência nacionais e internacionais abre portas para a troca de conhecimentos, a realização de pesquisas conjuntas e a mobilidade acadêmica, enriquecendo a formação dos futuros engenheiros. A busca por fomento à pesquisa, inclusive com a indústria, é vital para direcionar os estudos às necessidades do mercado e gerar soluções aplicáveis. O incentivo à participação em editais que promovam o desenvolvimento colaborativo entre universidades/centros de pesquisa e a indústria é outro ponto chave, pois estimula a criação de projetos que beneficiam ambos os lados e aceleram a inovação.

3.2. A IMPORTÂNCIA DA INTERDISCIPLINARIDADE E DA PESQUISA APLICADA

A interdisciplinaridade é um pilar para o avanço do conhecimento, tanto básico quanto aplicado, na Engenharia de Materiais. A capacidade de formar egressos aptos a atuar em equipes multidisciplinares é uma necessidade premente, dado que os desafios complexos da indústria moderna raramente podem ser resolvidos por uma única área do conhecimento. A modalidade profissional dos cursos é vista como um catalisador para aumentar o impacto da Engenharia de Materiais no desenvolvimento socioeconômico do país, com foco na pesquisa aplicada e na transferência de tecnologias que gerem valor real para a sociedade e a economia.

O conhecimento da ciência dos materiais representa um diferencial competitivo da profissão em relação a outras engenharias. Esse diferencial deve ser amplamente explorado, abordando desafios cruciais como o uso eficiente de materiais, a melhoria de suas propriedades para aplicações específicas e o desenvolvimento de processos de produção que visem menor custo, menor impacto ambiental, maior eficiência energética e qualidade superior. Novas ferramentas, como os recursos computacionais para simulações e o tratamento de grandes volumes de informação, são poderosos aliados nessas tarefas. No entanto, é fundamental ressaltar que essas tecnologias são ineficazes sem um conhecimento básico sólido para o desenvolvimento contínuo e a análise crítica dos resultados, garantindo que a tecnologia seja uma ferramenta e não um substituto para a compreensão fundamental.

3.3. OPORTUNIDADES DE CARREIRA E EMPREENDEDORISMO

A Engenharia de Materiais oferece um cenário profissional vasto e dinâmico, com uma gama impressionante de oportunidades de carreira tanto no setor industrial quanto no acadêmico, além de um terreno fértil para o empreendedorismo de inovação. A singularidade dessa área reside em sua natureza fundamentalmente ubíqua, o que significa que o conhecimento em materiais é crucial em todas as fases do ciclo de vida de um produto. Desde a concepção inicial e a pesquisa básica em laboratório, onde cientistas e engenheiros exploram novas composições e estruturas para desenvolver materiais com propriedades aprimoradas, até as etapas complexas de projeto, fabricação, controle de qualidade e, finalmente, a comercialização e logística, a expertise do engenheiro de materiais é indispensável.

Essa onipresença se traduz em uma demanda robusta por esses profissionais em diversos setores estratégicos para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil. Na infraestrutura, eles são essenciais para o avanço da construção civil, transportes e energia, desenvolvendo materiais mais resistentes, leves e sustentáveis. No campo da tecnologia, a Engenharia de Materiais é a espinha dorsal de inovações em eletrônicos, dispositivos médicos, biotecnologia e nanotecnologia, impulsionando a próxima geração de produtos. O setor de energia, por sua vez, é um dos mais aquecidos para os engenheiros de materiais, seja no desenvolvimento de materiais para exploração de petróleo e gás, seja na criação de soluções avançadas para fontes renováveis, como células solares mais eficientes ou materiais para armazenamento de energia.

A expansão de programas educacionais focados em áreas emergentes, como energias renováveis e sistemas, exemplificada pela iniciativa do novo campus do ITA em Fortaleza, demonstra claramente o reconhecimento da importância desses profissionais para o futuro do país. Essa tendência reflete a necessidade premente de especialistas capazes de inovar e otimizar o uso de recursos, garantindo um desenvolvimento mais sustentável e competitivo. Para o engenheiro de materiais, isso se traduz em um futuro promissor, com a possibilidade de atuar em grandes corporações, liderar equipes de pesquisa e desenvolvimento em instituições renomadas, ou, de forma crescente, empreender, criando startups de base tecnológica que impulsionam a inovação e geram soluções disruptivas para os desafios do mercado e da sociedade. O conhecimento profundo sobre a interação entre estrutura, processamento, propriedades e desempenho dos materiais é a chave para desbravar essas inúmeras avenidas de sucesso.

4. HISTÓRICO DA CRIAÇÃO E EXPANSÃO DOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS NO BRASIL

4.1. OS PRIMÓRDIOS: O PAPEL DE SÃO CARLOS (UFSCAR, USP) E DE CAMPINA GRANDE (UFPB/UFCG)

A cidade de São Carlos é amplamente reconhecida como o "berço" da Engenharia de Materiais no Brasil, consolidando-se como um polo tecnológico de destaque. A região se caracteriza por uma alta concentração de doutores – dez vezes maior que a média nacional – e um ecossistema robusto de empresas de tecnologia, abrigando duas grandes universidades públicas, a UFSCar e a USP, além de outras instituições de ensino e pesquisa.

As raízes da formação em materiais na região remontam a 1953, quando a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) estabeleceu as cadeiras de Metalurgia I e II para seus cursos de Engenharia Civil e Mecânica. Este foi um

passo fundamental que pavimentou o caminho para o desenvolvimento do campo de materiais no ensino superior.

O marco decisivo para a Engenharia de Materiais como curso independente ocorreu em 1972, com a criação do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Este departamento foi o primeiro de Engenharia da UFSCar e o pioneiro em Engenharia de Materiais no Brasil, apresentando uma proposta inovadora para a área na América Latina. Embora o Departamento tenha sido criado em 1972, o primeiro curso de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil é datado de 1970, o que se infere ser o curso da UFSCar.

O segundo curso surgiu apenas nove anos depois, em 1979, no campus II da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em Campina Grande, que mais tarde foi desmembrado tornando-se o campus sede da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na Paraíba.

Campina Grande emerge como um importante polo de ensino superior e produção de ciência e tecnologia no Nordeste do Brasil. A cidade se destaca por sua sólida tradição acadêmica e um vibrante ecossistema de inovação, que atrai talentos e impulsiona o desenvolvimento científico e tecnológico. A presença de instituições de ensino superior de excelência, como a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e outras notáveis instituições, consolida a cidade, como UEPB e IFPB, como um centro de formação de profissionais altamente qualificados.

As raízes dessa vocação para a engenharia e a ciência em Campina Grande são profundas. Um marco fundamental para a Engenharia de Materiais no país, e para a própria cidade, foi a criação do segundo curso de graduação em Engenharia de Materiais do Brasil em 1979 na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Este pioneirismo, vindo apenas nove anos após o primeiro curso no país, demonstra a visão estratégica e o compromisso da UFCG e de Campina Grande com o avanço de áreas importantes para o desenvolvimento industrial e tecnológico. Desde então, Campina Grande tem cultivado um ambiente propício à pesquisa e ao desenvolvimento, com foco em áreas de ponta. A cidade é reconhecida por sua produção científica relevante e pela formação de mão de obra especializada, o que a posiciona como um centro dinâmico para a inovação e o empreendedorismo tecnológico no cenário nacional.

A lentidão na criação de cursos de Engenharia de Materiais até 1990, com apenas duas universidades oferecendo a formação, indica uma fase inicial de desenvolvimento altamente especializada e concentrada. Essa concentração sugere que a disciplina era impulsionada por demandas industriais ou de pesquisa muito específicas nas regiões de São Carlos e Campina Grande. A forte origem acadêmica e a predominância de universidades públicas nesse período inicial estabeleceram uma base teórica e prática robusta, focada no estabelecimento da disciplina e na pesquisa, em vez de uma produção em massa de graduados. Essa fase inicial, enraizada no avanço científico, contrasta com a expansão posterior, que viria a ser mais rápida e generalizada.

4.2. MARCOS TEMPORAIS DA PROLIFERAÇÃO DE CURSOS (1970S, 1990S, 2000S E PÓS-2010)

Até 1990, a formação de profissionais e a promoção da profissão na indústria brasileira eram responsabilidade exclusiva das duas universidades pioneiras, UFSCar e UFCG. Essa concentração limitava o alcance da formação e a inserção de engenheiros de materiais no mercado nacional.

A partir de 1990, houve um reconhecimento crescente da necessidade dessa formação por outras escolas de engenharia. Como resultado, em 1999, o Brasil já contava com 10 cursos de Engenharia de Materiais ativos, marcando uma fase de aceleração moderada na expansão da oferta educacional.

Os anos 2000 foram caracterizados por uma "explosão de ofertas" de cursos de engenharia, incluindo a de materiais. Esse crescimento foi impulsionado por incentivos governamentais para a expansão do ensino superior. Entre 2000 e 2009, o número total de cursos de engenharia mais que triplicou. Essa rápida expansão quantitativa, impulsionada por políticas públicas, pode ter priorizado o volume de cursos em detrimento de uma avaliação meticulosa da qualidade ou da capacidade de absorção do mercado a longo prazo.

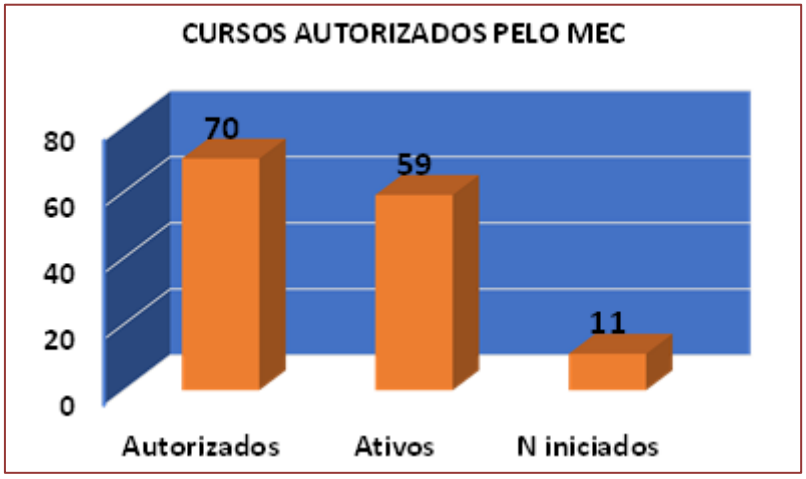
A partir de 2010, a expansão continuou, mas começou a mostrar sinais de estabilização. Em 2013, havia 47 cursos ativos, e um foi extinto. Desde 2014, o número de cursos de Engenharia de Materiais se equilibrou, mantendo a marca de 54 cursos por três anos consecutivos, conforme dados da plataforma e-MEC. Essa fase de estabilização pode indicar uma saturação do mercado educacional, uma mudança nas políticas governamentais ou um platô natural após o surto inicial de crescimento. Compreender esse padrão de crescimento por fases é crucial para analisar os desafios atuais, pois a rápida expansão dos anos 2000, se não acompanhada por mecanismos robustos de controle de qualidade, pode ter contribuído para a heterogeneidade na qualidade educacional e para o descompasso entre a formação de graduados e as necessidades do mercado de trabalho.

5. PANORAMA ATUAL DOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

5.1. NÚMERO DE CURSOS E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA POR UNIDADE FEDERATIVA

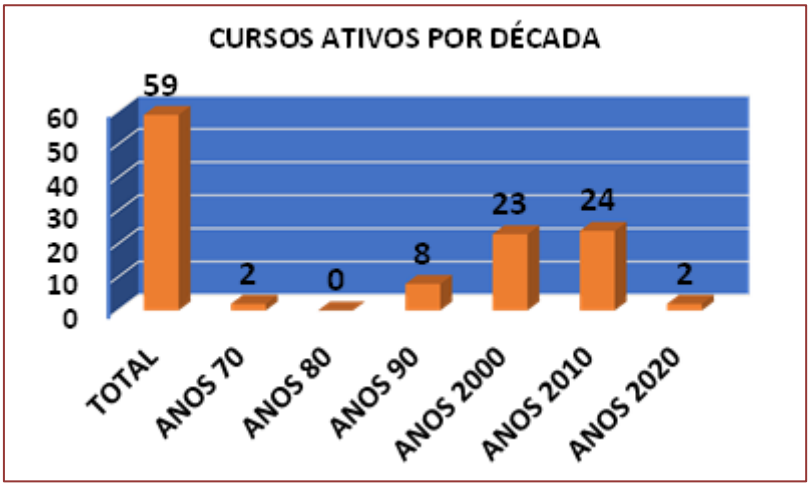
Conforme dados da plataforma e-MEC (MEC), o número de cursos de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil se estabilizou em torno de 54 por três anos consecutivos a partir de 2014, havendo em 2025 70 cursos autorizados, dos quais 59 ativos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1. Cursos de Engenharia de Materiais autorizados pelo MEC (Fonte: e-MEC)



A distribuição de cursos que iniciaram as atividades a partir da autorização por parte do MEC, ver Figura 2, que na década de 1970 só estiveram em atividade os dois cursos pioneiros, UFSCar e da UFCG, que, como sucedânea da UFPB, assumiu o curso a partir de 2002. Na década de 1980, não houve início de atividade de nenhum curso. Dos 59 cursos em atividade, cerca de 80% iniciaram as atividades nas décadas de 2000 e 2010.

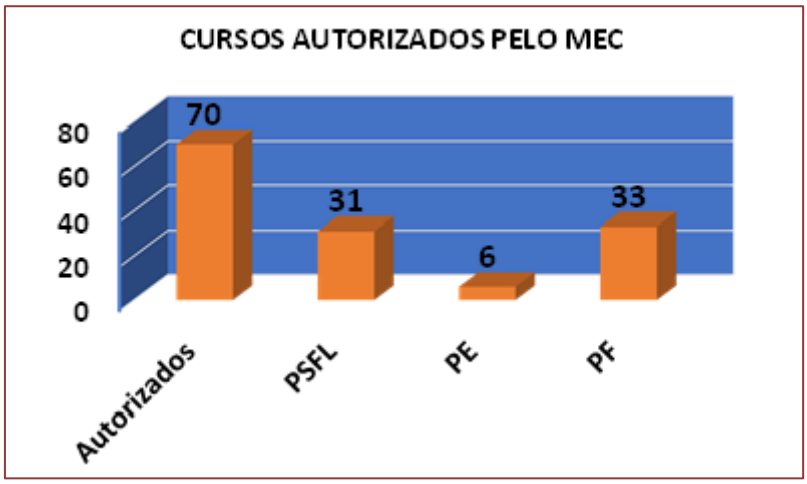
Figura 2. Distribuição dos cursos que iniciaram as atividades ao longo das décadas (Fonte: e-MEC).



5.2. DADOS SOBRE OS CURSOS AUTORIZADOS

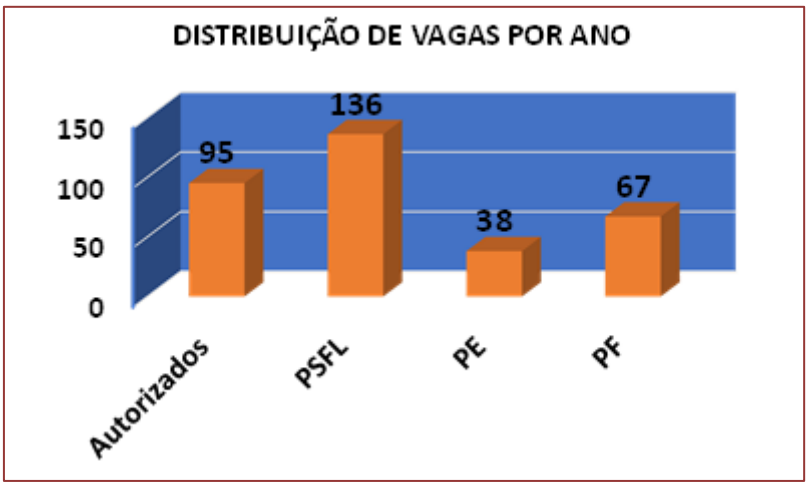
Como mostrado na Figura 3, dos cursos autorizados pelo MEC, 47% são de Instituições de Ensino Superior (IES) Públicas Federais (PF), 44% de Privadas Sem Fins Lucrativos (PSFL) e 9% de públicas estaduais.

Figura 3. Distribuição dos cursos autorizados por natureza jurídica da IES (Fonte: e-MEC).



Quanto à distribuição de vagas por ano para os cursos autorizados (ver Figura 4), observa-se que, para uma média global de 96 vagas/curso/ano, há uma grande discrepância entre a média de vagas por ano das PSFL (136) frente às PF (67) e PE (38), o que se configura em um grande paradoxo, com o MEC autorizando mais vagas para instituições ditas sem fins lucrativos, mas para as quais os alunos pagam mensalidade ou elas são custeadas pelo Governo Federal, do que para as públicas mantidas pelo mesmo governo ou pelo Governo Estadual.

Figura 4. Distribuição de vagas anuais para cursos autorizados pelo MEC (Fonte: e-MEC).



6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AUMENTO DO NÚMERO DE CURSOS

6.1. VANTAGENS

O aumento substancial no número de cursos de graduação em Engenharia de Materiais, inserido no contexto da expansão do ensino superior brasileiro, trouxe consigo vantagens significativas.

Primeiramente, houve uma ampliação do acesso e democratização do ensino superior. A proliferação de vagas e matrículas em cursos de engenharia, impulsionada por incentivos governamentais nos anos 2000, permitiu que um número consideravelmente maior de estudantes em todo o país tivesse a oportunidade de acessar a educação superior em engenharia, contribuindo para uma maior inclusão e democratização do ensino.

Em segundo lugar, essa expansão gerou um potencial para suprir demandas tecnológicas e industriais. A Engenharia de Materiais é reconhecida como uma área de importância estratégica para o desenvolvimento tecnológico, econômico e social do Brasil. Teoricamente, a maior oferta de cursos deveria resultar em um aumento de profissionais qualificados, capazes de atuar em diversos setores industriais cruciais, como petroquímica, siderurgia, automobilística, e em novas áreas de ponta como biomateriais e nanotecnologia. Uma maior disponibilidade de talentos é vista como um fator que pode impulsionar o PIB e a capacidade de inovação do país, à medida que a engenharia é um motor para o crescimento econômico.

Por fim, o crescimento da graduação contribuiu para o fortalecimento da base de pesquisa e inovação em materiais. O notável crescimento da área de Materiais no contexto da pós-graduação da CAPES, com um aumento de 215% no número de programas e uma consolidação da qualidade, é um indicativo de uma base de pesquisa mais robusta. Mais cursos de graduação podem servir como um celeiro de talentos para esses programas de pós-graduação, fortalecendo o ecossistema de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no país e impulsionando a inovação em materiais. Embora a expansão quantitativa da graduação tenha sido criticada por suas implicações na qualidade, ela inegavelmente ampliou o acesso ao ensino superior e estabeleceu as bases para uma força de trabalho de engenheiros potencialmente maior. Este é um passo fundamental para alcançar os objetivos de desenvolvimento nacional, mesmo que a qualidade dessa expansão necessite de um exame crítico contínuo.

6.2. DESVANTAGENS E DESAFIOS ASSOCIADOS

Apesar das vantagens da expansão, o aumento do número de cursos de Engenharia de Materiais no Brasil também trouxe consigo desafios significativos e desvantagens, principalmente relacionadas à qualidade da formação e à adequação ao mercado de trabalho.

Um dos principais problemas são as altas taxas de evasão e a baixa taxa de conclusão. Embora tenha havido um crescimento expressivo na oferta de vagas e matrículas em cursos de engenharia entre 2005 e 2015 (128% na rede pública e 395% na privada), as taxas de evasão oscilam em patamares próximos a 50%. Estima-se que, para cada 1.000 candidatos, apenas 175 ingressam e, destes, somente 95 concluem o curso, o que revela um "funil" acentuado na formação de engenheiros. Essa discrepância entre matrículas e concluintes indica que muitos alunos iniciam o curso, mas não conseguem finalizá-lo, resultando em um desperdício de recursos e expectativas.

Em 2023, o Brasil formou 95.607 engenheiros nas diversas modalidades de engenharia. No entanto, a distribuição entre instituições públicas e privadas não foi divulgada diretamente nos dados mais recentes. Ainda assim, há algumas pistas importantes informadas na sequência. Instituições privadas continuam sendo responsáveis pela maior parte das vagas e formandos em engenharia. Isso se deve à expansão acelerada dessas instituições na última década, especialmente na modalidade EAD. Já as instituições públicas mantêm uma participação menor em número absoluto de formandos, mas geralmente oferecem cursos com melhor avaliação de qualidade, segundo o ENADE e outros indicadores. Para se ter uma ideia da diferença de qualidade, enquanto 81% dos cursos públicos de Engenharia Civil receberam nota 4 ou 5 no ENADE, apenas 8% dos cursos privados alcançaram essas notas. Assim, outro desafio crítico é a qualidade heterogênea do ensino. Isso sugere que a maioria dos engenheiros brasileiros está sendo formada por instituições com qualidade questionável. As deficiências na base educacional, ou seja, a baixa qualidade do ensino fundamental e médio, são apontadas como um fator que favorece interrupções no fluxo escolar e dificulta o acesso e a permanência no ensino superior. Adicionalmente, apesar das Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) para os cursos de engenharia preverem o desenvolvimento de competências e habilidades gerais, a prática tem mostrado o predomínio de uma matriz "conteudista" na construção dos currículos, muitas vezes dissociada das competências desejadas e do perfil esperado do egresso.

Há também um desalinhamento com as necessidades da indústria. O Brasil ocupa uma das piores posições no indicador de número de engenheiros por habitante em comparação com nações de renda média e alta. Dados de 2025 estão indicados na Tabela 1. Isso se reflete em reclamações recorrentes sobre a dificuldade de contratar bons profissionais, mesmo em momentos de expansão econômica. O modelo de formação atual não tem estimulado adequadamente o desenvolvimento de habilidades e competências não instrumentais, como criatividade, atitude empreendedora, capacidade de identificar e resolver problemas, e pensamento crítico e sistêmico. Há uma desconexão entre os esforços de pesquisa e a necessidade de soluções focadas em problemas reais, manifestada na insuficiência de práticas laboratoriais que vão além de demonstrações científicas e na reduzida vinculação entre teoria e experiência prática. A contratação de docentes, muitas vezes sem formação pedagógica ou vivência na prática industrial da engenharia, contribui para a reprodução de modelos tradicionais de ensino e pesquisas menos conectadas às demandas das empresas.

Tabela 1. Engenheiros por 1.000 habitantes

País	Engenheiros por 1.000 habitantes	Observações relevantes
Brasil	**5,5**	Número considerado baixo; ideal seria 15 por 1.000 segundo a CNI.
Estados Unidos	**25**	Alta proporção, mas ainda enfrenta escassez de engenheiros.
China	**13**	Crescimento acelerado; forma entre 1,4 e 1,5 milhão de engenheiros por ano.
Japão	**25**	Proporção semelhante à dos EUA e Alemanha.
Coreia do Sul	**25**	Também entre os países com maior densidade de engenheiros.

Fontes: Estadão, toledoprudente.com.br e diáriosocialista.net.

Esses números refletem estimativas recentes e podem variar conforme a metodologia usada em cada país. A China, por exemplo, inclui engenheiros formados em programas vocacionais e universitários.

A aparente superoferta de graduados versus um déficit de qualificação é uma contradição complexa. Um estudo de 2010 já previa que o Brasil formaria entre 80 mil e 107 mil engenheiros até 2020, número atingido tendo em vista o total de formados em 2023. Uma atualização desse estudo revelou que, mantendo a previsão de 60 mil vagas em 2020, o número de engenheiros que entraria no mercado saltaria para 148 mil, o que representaria 2,46 vezes mais engenheiros do que o mercado seria capaz de absorver. Contudo, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) estimou, em 2023, um déficit de 75 mil engenheiros no mercado de trabalho. Essa aparente contradição não indica uma falta de *número* de engenheiros, mas sim uma falta de engenheiros *qualificados e bem-formados*. Muitos graduados podem não estar adequadamente preparados para as demandas da indústria, o que dificulta sua inserção em cargos de engenharia, levando-os a desempenhar funções técnicas ou de nível médio.

Por fim, observa-se um desinteresse crescente por engenharias. Nos últimos dez anos, o Brasil registrou uma queda de 23% no número de estudantes em cursos de engenharia, passando de 469,4 mil ingressantes em 2014 para 358,4 mil em 2023. Esse fenômeno é atribuído à desindustrialização de longo prazo no país, à pandemia e às crises econômicas. A dificuldade dos jovens com disciplinas de exatas no ensino fundamental e médio também é um fator crucial; o Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (Pisa) de 2022 revelou que cerca de 73% dos estudantes brasileiros de 15 anos têm dificuldades em resolver problemas matemáticos simples. Além disso, a percepção da indústria como o "lado sujo" da tecnologia e a falta de diversidade e representatividade nos quadros docentes e administrativos contribuem para afastar os jovens da área.

7. CONCLUSÃO

A trajetória da criação e expansão dos cursos de graduação em Engenharia de Materiais no Brasil é marcada por fases distintas: um início lento e concentrado em poucas instituições públicas de excelência, seguido por uma rápida proliferação impulsionada por políticas governamentais nos anos 2000, e uma posterior estabilização. Essa expansão quantitativa, embora tenha democratizado o acesso ao ensino superior em engenharia, especialmente através da rede privada, gerou uma heterogeneidade significativa na qualidade da formação.

O paradoxo de um aumento no número de graduados coexistindo com um "déficit" de engenheiros no mercado de trabalho não é uma questão de escassez numérica, mas sim de adequação e qualificação. As altas taxas de evasão, a baixa taxa de conclusão e a qualidade inconsistente do ensino, evidenciada pelos baixos IGCs de muitas instituições, resultam em profissionais que, por vezes, não possuem as competências e habilidades exigidas pela indústria moderna. O desalinhamento curricular, a falta de experiência prática dos docentes e o desinteresse crescente dos jovens pelas engenharias, agravado por deficiências na educação básica, contribuem para essa lacuna qualitativa.

Em contraste, a área de pós-graduação em Materiais demonstra um crescimento robusto e uma consolidação da qualidade, especialmente em instituições públicas, atuando como um motor para pesquisa e inovação. O desafio central para o Brasil é,

portanto, transpor a excelência da pesquisa e da formação de ponta para o nível de graduação em larga escala.

Para que a Engenharia de Materiais continue a ser um pilar estratégico para o desenvolvimento nacional, é imperativo que as políticas educacionais e as instituições de ensino se concentrem na melhoria da qualidade da formação. Isso implica em: (1) reavaliar e alinhar os currículos às demandas do mercado, priorizando o desenvolvimento de competências práticas e habilidades não instrumentais; (2) investir na qualificação docente, incentivando a experiência industrial e a formação pedagógica; (3) fortalecer a educação básica para despertar o interesse em ciências exatas desde cedo; e (4) promover uma maior integração entre universidades e indústria, fomentando a pesquisa aplicada e a transferência de tecnologia. Somente assim será possível formar engenheiros de materiais que não apenas preencham as vagas, mas que realmente impulsionem a inovação e a competitividade do país.

REFERÊNCIAS

Trata-se de um artigo opinativo com dados de terceiros. A seguir, bibliografia consultada para a composição do texto.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

[1] BRASIL. Ministério da Educação. **e-MEC - Sistema de Regulação do Ensino Superior**., [s.d.]. Disponível em: https://emec.mec.gov.br/. Acesso em: 26 maio 2025.

[2] BRASIL. Portal de Dados Abertos. **Microdados do Censo Escolar**., [s.d.]. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/microdados-do-censo-escolar. Acesso em: 26 maio 2025.

[3] CAPES. **Documento de Área Área 47: Materiais**., 2019. Disponível em: https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/Materiais.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.

[4] CNN BRASIL. **Cerca de 70% dos recém-formados garantem vaga no mercado de trabalho, diz estudo**., 19 jul. 2022. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/cerca-de-70-dos-recem-formados-garantem-vaga-no-mercado-de-trabalho-diz-estudo/. Acesso em: 26 maio 2025.

[5] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Ensino de Engenharia: Fortalecimento e Modernização**., [s.d.]. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/5e/ec/5eec09ca-2b12-4880-8a0b-804411795ea7/ensino_de_engenharia_web.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.

[6] EWERS, Juliana. **Em três anos, número de engenheiros formados já supera em 2,5 vezes demanda prevista para 2020**. USP, [s.d.]. Disponível em: https://sites.usp.br/lgi/em-tres-anos-numero-de-engenheiros-formados-ja-supera-em-25-vezes-demanda-prevista-para-2020/. Acesso em: 26 maio 2025.

[7] JORNAL A MATÉRIA - UFSCar. **São Carlos como berço da Engenharia de Materiais no Brasil**., [s.d.]. Disponível em: https://www.jornalamateria.ufscar.br/projetos/sao-carlos-como-berco-da-engenharia-de-materiais-no-brasil. Acesso em: 26 maio 2025.

[8] QUERO BOLSA. **Engenheiro de Materiais: O que faz, Como atua e Salário**., [s.d.]. Disponível em: https://querobolsa.com.br/carreiras-e-profissoes/engenheiro-de-materiais. Acesso em: 26 maio 2025.

[9] REVISTA ENSINO SUPERIOR. **Como vencer o déficit de 75 mil engenheiros?**., 16 abr. 2025. Disponível em: https://revistaensinosuperior.com.br/2025/04/16/como-vencer-o-deficit-de-75-mil-engenheiros/. Acesso em: 26 maio 2025.

[10] UNICESUMAR. **Formação de engenheiros enfrenta desafios no Brasil**., 18 dez. 2017. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/formacao-de-engenheiros-enfrenta-desafios-no-brasil/. Acesso em: 26 maio 2025.

[11] UNESC. **Empregabilidade em Engenharia de Materiais**., 12 jul. 2012. Disponível em: https://www.unesc.net/portal/blog/ver/67/19969. Acesso em: 26 maio 2025.

[12] UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE (UFCG). **Profissão: Engenheiro de Materiais**., [s.d.]. Disponível em: https://uaema.ufcg.edu.br/profissao/. Acesso em: 26 maio 2025.

[13] UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS (UFLA). **Mercado de Trabalho**., [s.d.]. Disponível em: https://engmateriais.ufla.br/index.php/mercado_trabalho/. Acesso em: 26 maio 2025.

[14] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCar). **Carreira: Engenharia de Materiais**., [s.d.]. Disponível em: https://www.ccema.ufscar.br/carreira. Acesso em: 26 maio 2025.

[15] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA (UFRB). **Bacharelado em Engenharia de Materiais**., [s.d.]. Disponível em: https://ufrb.edu.br/cetens/gestao/16-interna/395-bacharelado-em-engenharia-de-materiais. Acesso em: 26 maio 2025.

CAPÍTULO

06 Serendipidade na ciência e engenharia de materiais: descobertas ao acaso que moldaram o mundo moderno

Resumo: A história da Ciência e Engenharia de Materiais revela que muitas descobertas significativas surgiram da serendipidade, que é a feliz combinação de acaso e sagacidade. Casos notáveis incluem a vulcanização da borracha por Charles Goodyear, o vidro de segurança de Édouard Bénédictus, o celuloide de John Wesley Hyatt, o náilon de Wallace Carothers, o policarbonato descoberto por Hermann Schnell e Daniel Fox, a plastificação do PVC por Waldo Semon, o Teflon de Roy Plunkett, as ligas com memória de forma (Nitinol) de William Buehler, o adesivo dos Post-it® Notes de Spencer Silver e Art Fry, o aço inoxidável de Harry Brearley e a Baquelite de Leo Baekeland. Em cada um desses exemplos, uma observação inesperada ou um acidente de laboratório, combinados com a capacidade do pesquisador de reconhecer e explorar o valor do imprevisto, levaram a inovações que transformaram indústrias e impactaram profundamente o mundo moderno. Essas descobertas reforçam a ideia de que a ciência não é apenas um processo linear, mas também se beneficia da curiosidade, da mente aberta e da disposição para desviar-se do plano original em busca de novas possibilidades.

1. INTRODUÇÃO

O termo "serendipidade", cunhado por Horace Walpole em 1754, descreve a ocorrência de descobertas afortunadas feitas por acaso ou quando se procurava outra coisa. Walpole baseou o termo num conto de fadas persa, "Os Três Príncipes de Serendip", cujos heróis "estavam sempre a fazer descobertas, por acidentes e sagacidade, de coisas que não procuravam". Embora a pesquisa científica seja frequentemente retratada como um processo linear e metódico, a história da Ciência e Engenharia de Materiais está repleta de exemplos marcantes de serendipidade. A serendipidade na ciência não é apenas sorte; é definida como descobertas que ocorrem na interseção do acaso e da sabedoria (ou sagacidade). Reconhece os limites das expectativas sobre fontes potenciais de conhecimento e destaca a importância da mente preparada para reconhecer e interpretar o inesperado.

Descobertas inesperadas, muitas vezes resultantes de acidentes, observações curiosas ou desvios de procedimentos planejados, levaram ao desenvolvimento de materiais que revolucionaram indústrias e impactaram profundamente a vida cotidiana. Como mencionado no artigo de Navarro (2001), a serendipidade desempenhou um papel crucial em diversas inovações em materiais. Este relatório expande esse tema, detalhando os casos citados, adicionando outros exemplos notáveis e aprofundando a análise sobre como o acaso, aliado à perspicácia do pesquisador, impulsionou o avanço na área de materiais.

2. CASOS DE SERENDIPIDADE EM MATERIAIS

2.1. VULCANIZAÇÃO DA BORRACHA NATURAL (CHARLES GOODYEAR, 1839)

A borracha natural, apesar de suas propriedades elásticas, apresentava sérias desvantagens: amolecia e ficava pegajosa com o calor e endurecia e tornava-se quebradiça com o frio. Charles Goodyear, um engenheiro de manufatura autodidata, dedicou anos e enfrentou inúmeras dificuldades financeiras, incluindo prisão por dívidas, na busca por um método para estabilizar a borracha. Ele experimentou misturar a borracha com diversos produtos químicos, como magnésia e ácido nítrico, muitas vezes em sua própria cozinha, mas sem sucesso duradouro. Em 1839, enquanto trabalhava na Eagle India Rubber Company e experimentava misturas de borracha com enxofre, Goodyear acidentalmente deixou cair uma amostra sobre um fogão quente. Em vez de derreter completamente, a borracha carbonizou como couro, permanecendo elástica e resistente a variações de temperatura. Goodyear, cuja mente estava preparada por anos de busca incessante, reconheceu imediatamente a importância do acidente. Ele percebeu que a combinação de calor e enxofre havia alterado fundamentalmente as propriedades da borracha. Embora tenha levado mais alguns anos para aperfeiçoar o processo e a fórmula exata, essa descoberta acidental, batizada de vulcanização, transformou a borracha em um material industrial vital.

2.2. VIDRO DE SEGURANÇA (ÉDOUARD BÉNÉDICTUS, 1903)

Édouard Bénédictus, um químico, artista e inventor francês, estava trabalhando em seu laboratório em 1903 quando acidentalmente derrubou um frasco de vidro. O frasco continha uma solução seca de nitrato de celulose (colódio). Bénédictus observou que, embora o vidro tivesse rachado, os fragmentos não se espalharam; permaneceram

unidos pela fina película de plástico que revestia o interior do frasco. A observação inicial foi intrigante, mas não imediatamente aplicada. Foi algum tempo depois, ao ler notícias sobre os perigos dos para-brisas de automóveis que se estilhaçavam em acidentes, que Bénédictus relembrou o incidente. Sua mente preparada conectou a observação acidental com um problema real e urgente. Ele percebeu que a película de celuloide poderia ser a chave para um vidro mais seguro. Experimentando, ele prensou a solução plástica entre duas folhas de vidro, criando o primeiro vidro laminado, que patenteou como "Triplex". Essa invenção, nascida de um acidente de laboratório e da sagacidade de Bénédictus em conectar eventos, revolucionou a segurança automotiva e arquitetônica.

2.3. CELULOIDE (JOHN WESLEY HYATT, DÉCADA DE 1860)

Em meados do século XIX, a escassez de marfim levou uma empresa de bilhar a oferecer um prêmio de US$ 10.000 por um substituto adequado. John Wesley Hyatt, um impressor de Nova York sem formação formal em química, aceitou o desafio. Sua jornada começou com uma observação acidental em sua gráfica: um frasco derramado de colódio (uma solução de nitrocelulose em éter e álcool, usada para revestir os dedos) havia endurecido, formando uma película resistente e transparente. Inspirado por isso, Hyatt começou a experimentar com nitrocelulose (piroxilina), um material perigosamente inflamável, numa cabana atrás de sua casa. Após muitas tentativas fracassadas de simplesmente revestir bolas de bilhar, ele descobriu que misturar uma preparação específica de nitrocelulose com cânfora sob calor e pressão resultava num material sólido, moldável e resistente. Ele patenteou essa "composição" em 1870, e ele e seu irmão a registraram como Celuloide. Embora as bolas de celuloide tivessem o inconveniente de ocasionalmente produzir "uma leve explosão" ao impacto, o material se tornou o primeiro termoplástico comercialmente bem-sucedido, usado em filmes, armações de óculos, joias de imitação e brinquedos, marcando o início da era dos plásticos. A descoberta surgiu da combinação de uma observação casual (o colódio derramado) e experimentação persistente e perigosa.

2.4. NÁILON (WALLACE CAROTHERS/DUPONT, 1935)

A descoberta do náilon na DuPont não foi um único evento serendipitoso, mas sim o resultado de pesquisa fundamental sistemática pontuada por momentos de observação aguçada. Wallace Carothers, contratado pela DuPont em 1928 para liderar pesquisas fundamentais sobre polímeros sem um produto específico em mente, estava explorando a formação de poliésteres e poliamidas. Em 1930, sua equipe, incluindo Julian Hill, já havia criado poliésteres, mas estes tinham pontos de fusão baixos demais para fibras têxteis. Ao investigar um poliéster de alto peso molecular em abril de 1930, Hill tocou a massa quente com uma haste de vidro e, ao puxá-la, formou-se um fio fino e sedoso. A observação crucial foi que, após resfriar, esse fio podia ser esticado ainda mais ("estiramento a frio"), tornando-se incrivelmente forte e elástico. Este foi o momento serendipitoso chave: a descoberta inesperada de que o estiramento a frio alinhava as macromoléculas, conferindo propriedades excepcionais à fibra. Embora esse primeiro poliéster não fosse comercialmente viável, a observação impulsionou a pesquisa. Carothers então voltou sua atenção para as poliamidas, consideradas mais estáveis. Em fevereiro de 1935, sua equipe sintetizou a poliamida-6,6. Aplicando o conhecimento adquirido com o estiramento a frio, eles produziram uma fibra com as propriedades desejadas: forte, elástica, resistente à água e com alto ponto de fusão. Este material, batizado de Náilon, foi patenteado em 1935

e lançado comercialmente em 1939, revolucionando a indústria têxtil e encontrando inúmeras outras aplicações.

2.5. POLICARBONATO (HERMANN SCHNELL/BAYER E DANIEL FOX/GE, 1953)

A descoberta do policarbonato ocorreu quase simultaneamente em 1953, por dois cientistas trabalhando independentemente em empresas concorrentes, ambos encontrando o material de forma inesperada durante pesquisas com outros objetivos. Na Bayer, Alemanha, o Dr. Hermann Schnell estava pesquisando novas classes de polímeros quando, ao reagir bisfenol A com fosgênio, obteve um polímero transparente e extremamente resistente que obstruiu seu equipamento. Inicialmente um inconveniente, suas propriedades notáveis foram logo reconhecidas. Na General Electric (GE), EUA, Daniel Fox buscava um novo material isolante para fios elétricos. Em seus experimentos, também utilizando bisfenol A, ele sintetizou um polímero com tenacidade e transparência excepcionais – descrito como um "resíduo pegajoso" difícil de remover do béquer. Ambos os cientistas, embora buscando outros resultados, tiveram a sagacidade de reconhecer o valor desses subprodutos acidentais. O material, patenteado como Makrolon (Bayer) e Lexan (GE), oferecia uma combinação única de transparência, resistência ao impacto e estabilidade térmica, encontrando aplicações vastas, de CDs a componentes automotivos e vidros à prova de balas.

2.6. PLASTIFICAÇÃO DO PVC (WALDO SEMON/BFGOODRICH, 1926)

O Poli(cloreto de vinila) (PVC) foi, na verdade, observado pela primeira vez acidentalmente por Henri Victor Regnault em 1835 e novamente por Eugen Baumann em 1872. Em ambos os casos, eles observaram um pó branco se formando em frascos de cloreto de vinila expostos à luz solar, mas consideraram a descoberta uma mera curiosidade acadêmica, sem interesse prático. O material era rígido, quebradiço e difícil de processar. A transformação do PVC em um material útil veio décadas depois, através da serendipidade de Waldo Semon na BFGoodrich em 1926. Semon não buscava melhorar o PVC; ele estava tentando desenvolver um adesivo sintético para colar borracha em metal. Em seus experimentos, ele tentou dissolver o PVC em vários solventes a altas temperaturas. Ao resfriar uma dessas misturas, em vez de um adesivo, ele obteve um material surpreendentemente flexível, elástico e à prova d'água. Semon teve a perspicácia de reconhecer que havia descoberto acidentalmente um método para plastificar o PVC, tornando-o processável e versátil. Essa descoberta transformou o PVC de uma curiosidade inútil em um dos plásticos mais produzidos e utilizados no mundo.

2.7. TEFLON (ROY PLUNKETT/DUPONT, 1938)

A descoberta do Politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon, é um exemplo clássico de serendipidade na pesquisa industrial. Em 1938, Roy Plunkett, um jovem químico da DuPont, estava pesquisando novos refrigerantes à base de clorofluorcarbonetos (CFCs). Ele havia armazenado gás tetrafluoretileno (TFE), um potencial refrigerante, em cilindros pressurizados. Um dia, ao tentar usar um desses cilindros, Plunkett e seu assistente, Jack Rebick, descobriram que nenhum gás saía, embora o cilindro ainda estivesse pesado, indicando a presença de material no interior. Intrigados com essa falha inesperada no experimento, eles decidiram investigar.

Serraram o cilindro e encontraram um pó branco e ceroso. Testes subsequentes revelaram as propriedades extraordinárias e inesperadas desse pó: era extremamente resistente ao calor e a produtos químicos, e notavelmente escorregadio (baixo coeficiente de atrito). O gás TFE havia polimerizado espontaneamente dentro do cilindro. Plunkett e a DuPont reconheceram o valor único desse material acidental, que foi patenteado como Teflon e, após usos iniciais em aplicações militares secretas (como no Projeto Manhattan), tornou-se famoso por suas aplicações em utensílios de cozinha antiaderentes e inúmeros usos industriais.

2.8. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (NITINOL) (WILLIAM BUEHLER/NAVAL ORDNANCE LABORATORY, 1959)

William Buehler e sua equipe no Laboratório de Material Bélico Naval dos EUA (NOL) não estavam procurando por materiais com propriedades "inteligentes". Sua pesquisa visava desenvolver ligas metálicas com alta resistência à fadiga e ao calor para serem usadas em cones de nariz de mísseis. Eles estavam sistematicamente testando várias composições de ligas de níquel-titânio. Durante uma reunião de gestão do laboratório em 1961 para revisar o progresso, uma tira de uma das ligas testadas, composta por aproximadamente 50% de níquel e 50% de titânio, que havia sido dobrada em forma de acordeão e estava sendo passada entre os participantes, foi acidentalmente exposta ao calor de um cachimbo por um dos gerentes técnicos. Para surpresa de todos, a tira metálica rapidamente e vigorosamente retornou à sua forma original reta. Esta demonstração dramática e inesperada revelou o Efeito de Memória de Forma (EMF) da liga. Buehler e sua equipe, reconhecendo a singularidade do fenômeno, investigaram-no mais a fundo. A liga foi nomeada Nitinol (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory). Embora a busca original fosse por propriedades estruturais passivas, a descoberta serendipitosa do EMF abriu campos inteiramente novos para aplicações ativas em dispositivos médicos (stents autoexpansíveis, fios ortodônticos), atuadores, acoplamentos e sistemas de segurança.

2.9. ADESIVO DOS POST-IT® NOTES (SPENCER SILVER E ART FRY/3M, 1968-1974)

A invenção dos onipresentes Post-it® Notes é uma história clássica de serendipidade em duas partes, envolvendo dois cientistas da 3M. A primeira parte ocorreu em 1968, quando o Dr. Spencer Silver estava pesquisando adesivos acrílicos superfortes. Em vez disso, ele acidentalmente criou um adesivo peculiarmente fraco: microesferas que aderiam levemente às superfícies, mas podiam ser removidas facilmente sem deixar resíduos e mantinham sua aderência para reutilização. Silver reconheceu a singularidade do adesivo, mas lutou por anos para encontrar uma aplicação prática, promovendo sua "solução sem problema" dentro da 3M. A segunda parte veio em 1974. Art Fry, outro cientista da 3M, cantava no coro de sua igreja e ficava frustrado porque os pedaços de papel que usava para marcar os hinos no hinário caíam constantemente. Ele precisava de um marcador que aderisse às páginas sem danificá-las. Lembrando-se de um seminário de Silver sobre o adesivo de baixa aderência, Fry teve seu momento "eureka". Ele percebeu que o adesivo "inútil" de Silver era a solução perfeita para seu problema. Fry aplicou o adesivo de Silver em pequenos pedaços de papel. A colaboração entre Silver e Fry, combinando a descoberta acidental do adesivo com a necessidade prática identificada por Fry, levou ao desenvolvimento do Post-it Note. Após desafios iniciais de marketing, o produto tornou-se um sucesso global.

2.10. AÇO INOXIDÁVEL (HARRY BREARLEY, 1913)

A descoberta do aço inoxidável por Harry Brearley em Sheffield, Inglaterra, também se encaixa no padrão da serendipidade. Em 1912, Brearley, metalurgista chefe dos laboratórios de pesquisa Brown-Firth, recebeu a tarefa de desenvolver um aço resistente à erosão para canos de armas de fogo, que se desgastavam rapidamente devido ao calor e atrito. Ele começou a experimentar adicionando diferentes quantidades de cromo ao aço, buscando resistência à erosão em altas temperaturas, não resistência à corrosão. Após testar várias ligas com teores de cromo variando de 6% a 15%, ele as descartou por não atenderem aos requisitos de resistência à erosão. O momento serendipitoso ocorreu semanas depois. Uma versão da história conta que Brearley notou que algumas das amostras descartadas em uma pilha de sucata não haviam enferrujado como as outras, especificamente aquelas com cerca de 13% de cromo. Outra versão, talvez mais plausível, relata que, ao preparar as amostras para análise microscópica (metalografia), ele precisou atacá-las com ácido nítrico. Brearley observou que suas ligas de alto cromo resistiam fortemente ao ataque ácido. Vindo de Sheffield, um centro tradicional de cutelaria, Brearley teve a sagacidade de reconhecer imediatamente o potencial dessa resistência à corrosão (não à erosão) para a fabricação de talheres que não enferrujariam, uma alternativa acessível à prata ou ao metal folheado. Ele chamou o material de "rustless steel" (aço sem ferrugem), mais tarde rebatizado de "stainless steel" (aço inoxidável). Embora outros pesquisadores na França, Alemanha e EUA estivessem trabalhando em ligas semelhantes na mesma época, foi a observação atenta de Brearley e sua conexão com uma aplicação prática que impulsionaram a comercialização do aço inoxidável.

2.11. BAKELITE (LEO BAEKELAND, 1907)

A invenção da Bakelite por Leo Baekeland, frequentemente citada como o primeiro plástico totalmente sintético, representa um caso interessante que mescla pesquisa direcionada com resultados inesperados. Baekeland, um químico belga-americano que já havia feito fortuna vendendo sua invenção do papel fotográfico Velox para a Kodak, decidiu deliberadamente entrar no campo das resinas sintéticas com o objetivo de encontrar um substituto sintético para a goma-laca (shellac), uma resina natural cara derivada de insetos. Ele começou a investigar sistematicamente as reações entre fenol e formaldeído. Seu primeiro sucesso foi a criação de uma resina solúvel chamada Novolak, que era quimicamente semelhante à goma-laca, mas não obteve sucesso comercial. Continuando sua pesquisa, Baekeland passou a explorar as condições sob as quais a reação fenol-formaldeído poderia produzir um material diferente. Ele descobriu que, ao controlar cuidadosamente a pressão e a temperatura durante a reação, em vez de uma resina solúvel, formava-se um polímero insolúvel e infusível que, quando misturado com cargas (como serragem), podia ser moldado em formas duras e resistentes ao calor. Este material, a Bakelite, era quimicamente distinto da goma-laca que ele buscava inicialmente. Portanto, embora A pesquisa de Baekeland era direcionada (encontrar um substituto para a goma-laca), a descoberta da Bakelite em si foi um resultado inesperado e não planejado de sua exploração sistemática das reações fenol-formaldeído sob condições variadas. Suas propriedades únicas – isolante elétrico, resistente ao calor e moldável – tornaram-na ideal para as indústrias elétrica e automobilística emergentes.

3. A NATUREZA DA SERENDIPIDADE EM MATERIAIS

Estes exemplos ilustram vários temas recorrentes na serendipidade em ciência de materiais, alinhados com a definição de descobertas na interseção do acaso e da sabedoria:

O papel do acaso nas descobertas científicas é notável. Muitas vezes, avanços significativos surgem de eventos não planejados, como acidentes de laboratório, falhas em experimentos ou a observação de subprodutos inesperados durante pesquisas com outros objetivos. Esses momentos oferecem oportunidades únicas para novas interpretações e direções de estudo.

Entretanto, o acaso por si só não basta. É fundamental que o observador possua sagacidade intelectual, ou seja, esteja preparado para reconhecer a relevância de eventos anômalos, conectar informações e investigar com curiosidade e persistência. Louis Pasteur já afirmava que "o acaso favorece apenas a mente preparada", e a história da ciência está repleta de exemplos de descobridores que souberam enxergar valor no inesperado.

A flexibilidade para desviar-se do plano original e explorar caminhos alternativos revelados pelo acaso também é essencial. Pesquisas fundamentais, que não se concentram rigidamente em resultados específicos, favorecem esse tipo de exploração criativa e inesperada, como foi o caso de Carothers na DuPont.

Muitas vezes, o reconhecimento da serendipidade ocorre somente em retrospectiva. É depois da conquista de um resultado valioso que se identifica a cadeia de eventos fortuitos que o tornou possível.

Descobertas serendipitosas têm o poder de transformar indústrias e resolver grandes desafios sociais. Elas podem gerar inovações radicais, inaugurar novos mercados, substituir recursos escassos e promover avanços significativos em diversas áreas.

4. CONCLUSÃO

A história da Ciência e Engenharia de Materiais é um testemunho eloquente do poder da serendipidade. Longe de ser um processo puramente lógico e previsível, a inovação em materiais é frequentemente pontuada por descobertas inesperadas que surgem na confluência do acaso e da mente preparada e perspicaz do pesquisador. Os casos da vulcanização da borracha, vidro de segurança, celuloide, náilon, policarbonato, PVC plastificado, Teflon, Nitinol, adesivo Post-it, aço inoxidável e Bakelite demonstram como observações acidentais, quando combinadas com a curiosidade e o conhecimento dos cientistas e engenheiros, podem levar a avanços revolucionários. Esses materiais não apenas moldaram o mundo moderno, mas também nos lembram da importância de fomentar a curiosidade, a observação atenta e a mente aberta na busca científica. A serendipidade continua a ser uma força motriz na inovação, e reconhecer e valorizar seu papel pode acelerar futuras descobertas no fascinante campo da Ciência e Engenharia de Materiais.

REFERÊNCIA

[1] NAVARRO, Rômulo Feitosa. Materiais e Meio ambiente. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2001.

BIBLIOGRAFIA ADICIONAL RECOMENDADA POR CASO DE SERENDIPIDADE

Vulcanização da Borracha Natural:

[1] SLACK, Charles Morse. Charles Goodyear: A Life of Invention and Perseverance. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1937.

[2] ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry. "Rubber, 3. Natural Rubber". Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. (Descrição técnica e histórica da borracha natural e sua vulcanização).

Vidro de Segurança:

[3] "Safety Glass: A Brief History". Glass on Web. (Artigo online conciso sobre a história do vidro de segurança).

[4] BÉNÉDICTUS, Édouard. Verres de sûreté. França, n. FR336626, 1903. (Patente original de Édouard Bénédictus para o vidro de segurança).

Celuloide:

[5] FRIEDEL, Robert. Being Useful: The Story of DuPont. Newark: University of Delaware Press, 2007. (Contextualiza a invenção do celuloide no desenvolvimento da indústria de polímeros).

[6] HYATT, John Wesley. Improvement in processes and apparatus for manufacturing pyroxylin. Estados Unidos, n. US105338A, 1870. (Patente original de John Wesley Hyatt para o celuloide).

Náilon:

[7] HERMES, Matthew E. Enough for One Lifetime: Wallace Carothers, Inventor of Nylon. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1996. (Biografia detalhada de Wallace Carothers e a pesquisa que levou ao náilon).

[8] DUPONT. Nylon, the first wholly synthetic textile fiber. [S. l.]: DuPont, [s.d.].. (Material informativo da DuPont sobre a história do náilon).

Policarbonato:

[9] SCHNELL, Hermann. Polycarbonates. In: Chemistry and Physics of Polycarbonates. New York: John Wiley & Sons, 1964. (Visão detalhada da química e física dos policarbonatos pelo descobridor da Bayer).

[10] FOX, Daniel W. Polycarbonates. Estados Unidos, n. US3030331A, 1962. (Patente de Daniel Fox para policarbonatos na General Electric).

Plastificação do PVC:

[11] KAUFMAN, Morris. The History of PVC: The First 100 Years. London: Maclaren and Sons, 1969. (História abrangente do PVC, incluindo a descoberta da plastificação).

[12] SEMON, Waldo L. Plasticized vinyl resin composition and products thereof. Estados Unidos, n. US2188396A, 1940. (Patente de Waldo Semon para o PVC plastificado).

Teflon:

[13] PLUNKETT, Roy J. Polymers of tetrafluoroethylene. Estados Unidos, n. US2230654A, 1941. (Patente original de Roy Plunkett para o Teflon).

[14] CHEMOURS. The history of Teflon. [S. l.]: Chemours, [s.d.]. (Informações históricas da Chemours, empresa spin-off da DuPont que comercializa o Teflon).

Ligas com Memória de Forma (Nitinol):

[15] BUEHLER, William J.; WANG, Frederick E. A summary of recent research on the Nitinol alloys. ASTM Special Technical Publication, v. 453, p. 63-87, 1969. (Artigo científico inicial sobre as propriedades do Nitinol).

[16] OTSUKA, Kazuhiro; WAYMAN, Calvin M. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. (Livro de referência sobre materiais com memória de forma).

Adesivo dos Post-it® Notes:

[17] 3M. The Story Behind Post-it® Notes. [S. l.]: 3M, [s.d.].

[18] SILVER, Spencer F. Microsphere adhesives. Estados Unidos, n. US3691140A, 1972. (Patente de Spencer Silver para o adesivo de microesferas).

[19] FRY, Arthur L. Repositionable pressure-sensitive adhesive sheet material. Estados Unidos, n. US4006284A, 1977. (Patente de Art Fry para o Post-it Note).

Aço Inoxidável:

[20] BREARLEY, Harry. Rustless steel. The Iron Age, v. 95, n. 1, p. 16-17, 1915. (Artigo inicial de Harry Brearley sobre o aço inoxidável).

[21] BARRACLOUGH, K. C.Steelmaking Before Bessemer, Volume 2: Crucible Steel. London: The Metals Society, 1984. (Contextualiza o desenvolvimento de ligas de aço na época de Brearley).

Bakelite:

[22] BAEKELAND, Leo H. Process for making insoluble products of phenol and formaldehyde. Estados Unidos, n. US942699A, 1909. (Patente fundamental de Leo Baekeland para a Bakelite).

[23] MEIKLE, Jeffrey L. American Plastic: A Cultural History, 1907-1945. New Brunswick: Rutgers University Press, 1995. (Analisa o impacto cultural e industrial da Bakelite)

CAPÍTULO

07 Desafios atuais da engenharia de materiais

Resumo: A engenharia de materiais constitui uma disciplina fundamental, intrínseca ao desenvolvimento tecnológico e à inovação em múltiplos setores industriais e científicos. A capacidade de conceber, produzir e otimizar materiais com propriedades específicas é um pilar para o avanço da sociedade moderna. Esta área do conhecimento é transversal, influenciando desde a microeletrônica e a medicina até a construção civil e a indústria aeroespacial, demonstrando sua relevância estratégica no panorama global.

Atualmente, a engenharia de materiais encontra-se em um ponto de inflexão, confrontada por demandas crescentes por soluções que sejam simultaneamente sustentáveis, de alto desempenho, economicamente viáveis, seguras para a saúde e integradas às inovações digitais. A natureza intrincada dessas questões implica que a resolução de um desafio frequentemente depende ou afeta outros, exigindo uma abordagem holística e multidisciplinar. Por exemplo, o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, embora fundamental para a sustentabilidade, pode apresentar novas considerações de custo ou desempenho. De igual modo, a aplicação de modelagem computacional na digitalização pode acelerar a otimização de processos e o desenvolvimento de biomateriais. Esta interdependência sublinha que a engenharia de materiais não pode abordar estas questões de forma isolada, mas sim através de uma ótica sistêmica, onde a pesquisa e o desenvolvimento são concebidos para otimizar múltiplos critérios simultaneamente, fomentando a colaboração interdisciplinar e a necessidade de ferramentas de análise multicritério.

Este capítulo visa apresentar uma análise aprofundada dos desafios contemporâneos na engenharia de materiais. Serão abordados aspectos relacionados à sustentabilidade, desempenho, custo, saúde e segurança, e digitalização, bem como tópicos complementares para aprofundamento do conhecimento na área.

1. DESAFIOS ATUAIS DA ENGENHARIA DE MATERIAIS

A engenharia de materiais é impulsionada por um conjunto de desafios multifacetados que moldam a pesquisa e o desenvolvimento. Estes desafios podem ser categorizados em cinco domínios principais: sustentabilidade, desempenho, custo, saúde e segurança, e digitalização. A compreensão detalhada de cada um é fundamental para direcionar os esforços de inovação e garantir o avanço da disciplina.

A Tabela 1 oferece uma visão geral concisa dos principais desafios e exemplos específicos que serão detalhados nas seções subsequentes.

Tabela 1: Principais Desafios e Exemplos na Engenharia de Materiais

Desafio	Exemplos Específicos
Sustentabilidade	Materiais biodegradáveis: Desenvolvimento de materiais que se decompõem no ambiente, reduzindo o acúmulo de resíduos. Reciclagem: Criação de processos eficientes para reciclar materiais complexos e compostos. Consumo de energia: Minimização do consumo de energia durante a produção e processamento de materiais.
Desempenho	Materiais multifuncionais: Desenvolvimento de materiais que combinam diversas propriedades, como resistência, leveza e condutividade. Extremófilos: Criação de materiais capazes de operar em condições extremas de temperatura, pressão e ambiente corrosivo. Miniaturização: Desenvolvimento de materiais com propriedades específicas para dispositivos em escala nanométrica.
Custo	Materiais de baixo custo: Busca por materiais alternativos e processos mais eficientes para reduzir custos de produção. Otimização de processos: Melhoria dos processos de fabricação para aumentar a eficiência e reduzir desperdícios.
Saúde e Segurança	Biomateriais: Desenvolvimento de materiais biocompatíveis para implantes médicos e engenharia de tecidos. Segurança alimentar: Criação de materiais seguros para o contato com alimentos e que prolonguem sua vida útil.
Digitalização	Modelagem computacional: Utilização de ferramentas de simulação para acelerar o desenvolvimento de novos materiais. Manufatura aditiva: Impressão 3D de componentes com geometrias complexas e propriedades personalizadas.

1.1. SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade representa um imperativo global, e a engenharia de materiais desempenha um papel crucial na mitigação do impacto ambiental. Este domínio abrange o desenvolvimento de materiais que se degradam naturalmente, a otimização de processos de reciclagem para composições complexas e a minimização do consumo energético ao longo do ciclo de vida dos materiais.

O desenvolvimento de materiais que se decompõem no ambiente é um desafio crucial para a redução do acúmulo de resíduos e a mitigação da poluição ambiental. A pesquisa foca na criação de polímeros e compósitos com estruturas que permitam a degradação por processos biológicos ou físico-químicos em prazos aceitáveis, sem liberação de substâncias nocivas. Este esforço é parte de uma transição fundamental de um modelo econômico linear ("extrair-produzir-descartar") para um modelo circular, onde o documento reforça essa conexão ao listar "Economia circular" como um tópico para aprofundamento. A engenharia de materiais, portanto, é um pilar para a implementação da economia circular, exigindo que os engenheiros considerem o ciclo de vida completo do material desde a concepção, incluindo sua reciclabilidade e biodegradabilidade.

A criação de processos eficientes para reciclar materiais complexos e compostos é um gargalo significativo. Materiais modernos frequentemente combinam diferentes fases e elementos, tornando a separação e recuperação de seus constituintes um desafio técnico e econômico. A menção específica de "reciclar materiais complexos e compostos" aponta para uma barreira técnica substancial. Ao contrário de materiais homogêneos, a reciclagem de compósitos (por exemplo, fibra de carbono com polímeros) ou produtos com múltiplas camadas e diferentes materiais (por exemplo, embalagens multicamadas) é extraordinariamente difícil. Isso se deve à dificuldade de separar os componentes sem degradá-los ou à ausência de processos eficientes para sua recuperação. Este desafio implica que a inovação não é apenas sobre a coleta e triagem, mas sobre a ciência fundamental da desconstrução e revalorização de materiais. A inovação nesta área é vital para fechar o ciclo de vida dos produtos e reduzir a dependência de matérias-primas virgens, exigindo que o desenvolvimento de novos materiais seja acompanhado pela concepção de estratégias de reciclagem eficientes desde a fase de projeto, demandando pesquisa em novas rotas químicas, mecânicas e térmicas para a separação e purificação de componentes.

A minimização do consumo de energia durante a produção e processamento de materiais é um objetivo fundamental para a sustentabilidade. Isso envolve o desenvolvimento de rotas sintéticas mais eficientes, a otimização de reatores e fornos, e a busca por processos que operem em temperaturas e pressões mais brandas.

1.2. DESEMPENHO

O desempenho dos materiais é uma busca contínua por funcionalidades aprimoradas e capacidades operacionais expandidas, essenciais para o avanço tecnológico em diversas indústrias. Este domínio engloba a criação de materiais multifuncionais, a concepção de "extremófilos" capazes de operar em condições adversas e o desenvolvimento de materiais para aplicações em escala nanométrica.

O desenvolvimento de materiais que combinam diversas propriedades, como resistência, leveza e condutividade, é um desafio de desempenho fundamental. A capacidade de integrar múltiplas funcionalidades em um único material permite a criação de componentes mais eficientes, compactos e com menor consumo de recursos, essenciais para a próxima geração de dispositivos e estruturas. A criação de materiais capazes de operar em condições extremas de temperatura, pressão e ambiente corrosivo é vital para aplicações em setores como aeroespacial, energia nuclear, exploração de petróleo e gás, e ambientes biomédicos hostis. Este desafio exige a compreensão e manipulação da estabilidade termodinâmica e cinética dos materiais sob estresse severo.

Os exemplos de desempenho, como materiais multifuncionais, extremófilos e miniaturização, não são apenas metas internas da engenharia de materiais; eles são pré-requisitos para o avanço de outras disciplinas e indústrias. Materiais para extremófilos são essenciais para a exploração espacial e energética; a miniaturização é a base da microeletrônica e dos sensores avançados; materiais multifuncionais permitem a otimização de veículos e estruturas. Isso demonstra que a capacidade de superar esses desafios de desempenho é um fator limitante ou habilitador para o progresso em campos como inteligência artificial, medicina de precisão, energia limpa e exploração espacial. O investimento em pesquisa e desenvolvimento de materiais de alto desempenho é, portanto, um investimento estratégico para a inovação em todo o ecossistema tecnológico e industrial, impulsionando a competitividade nacional e global.

O desenvolvimento de materiais com propriedades específicas para dispositivos em escala nanométrica é um pilar da miniaturização tecnológica. A manipulação da matéria em escalas tão pequenas permite a exploração de fenômenos quânticos e de superfície, que conferem propriedades únicas, como maior área superficial, reatividade catalítica aprimorada e novas características eletrônicas e ópticas. A menção explícita de "Miniaturização: Desenvolvimento de materiais com propriedades específicas para dispositivos em escala nanométrica" e a listagem de "Nanomateriais" como um tópico para aprofundamento revelam uma forte tendência de que grande parte das futuras inovações em desempenho virá do controle e manipulação da matéria na escala nanométrica. As propriedades dos materiais mudam drasticamente quando suas dimensões são reduzidas para essa escala, abrindo portas para funcionalidades antes inatingíveis. A nanotecnologia não é apenas uma área de pesquisa, mas uma ferramenta transversal que permeia a solução de desafios de desempenho, exigindo que os engenheiros de materiais dominem a síntese, caracterização e aplicação de nanomateriais para criar a próxima geração de tecnologias.

1.3. CUSTO

Os imperativos econômicos impulsionam significativamente a inovação em materiais. Este domínio concentra-se na busca por alternativas de baixo custo e na otimização contínua dos processos de fabricação para aumentar a eficiência e reduzir o desperdício, visando a viabilidade comercial das soluções.

A busca por materiais alternativos e processos mais eficientes para reduzir custos de produção é um desafio constante. Isso envolve a exploração de matérias-primas abundantes e menos caras, bem como a concepção de rotas sintéticas que minimizem o uso de reagentes caros ou etapas de processamento complexas. Embora o desempenho e a sustentabilidade sejam motores de inovação, o custo atua como um filtro comercial decisivo. Um material tecnologicamente superior ou ambientalmente amigável pode não ser adotado em larga escala se seu custo de produção for proibitivo. Isso sugere que a engenharia de materiais não pode operar em um vácuo puramente científico; ela deve integrar considerações econômicas desde as fases iniciais de pesquisa e desenvolvimento. O desafio não é apenas criar o "melhor" material, mas o "melhor material viável" para uma aplicação específica. A pesquisa em engenharia de materiais deve incorporar análises tecno-econômicas e de ciclo de vida para garantir que as inovações sejam não apenas cientificamente robustas, mas também comercialmente escaláveis e competitivas no mercado.

A melhoria dos processos de fabricação para aumentar a eficiência e reduzir desperdícios é crucial para a competitividade. A otimização abrange desde a redução do tempo de ciclo de produção até a minimização de subprodutos indesejados e o aumento do rendimento das reações, impactando diretamente a lucratividade e a sustentabilidade. A otimização de processos, um sub-tópico do custo, é intrinsecamente ligada à digitalização, por meio da modelagem computacional e manufatura aditiva. Ferramentas digitais permitem simular processos, prever falhas e otimizar parâmetros de forma virtual, reduzindo a necessidade de experimentação física cara e demorada. Adicionalmente, a redução de desperdícios na otimização de processos contribui diretamente para metas de sustentabilidade, como a economia circular. Essa interconexão revela que investimentos em digitalização e sustentabilidade podem gerar retornos significativos na redução de custos. A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 na

engenharia de materiais é um caminho estratégico para alcançar eficiências de custo e, simultaneamente, avançar em objetivos de sustentabilidade, criando um ciclo virtuoso de inovação.

1.4. SAÚDE E SEGURANÇA

A dimensão da saúde humana e da segurança alimentar é crucial na engenharia de materiais. Este domínio aborda o desenvolvimento de materiais biocompatíveis para aplicações médicas e a criação de materiais seguros para contato com alimentos, visando a proteção da saúde pública e a extensão da vida útil de produtos.

O desenvolvimento de materiais biocompatíveis para implantes médicos e engenharia de tecidos é um campo de pesquisa de alta relevância. O desafio reside em criar materiais que não apenas desempenhem suas funções mecânicas ou estruturais, mas que também interajam de forma harmoniosa com o ambiente biológico, promovendo a regeneração tecidual e minimizando reações adversas. Ao contrário de outros desafios onde o desempenho ou o custo podem ser os principais impulsionadores, a saúde e segurança introduzem uma forte dimensão ética e regulatória. O desenvolvimento de biomateriais e materiais para segurança alimentar exige um rigoroso processo de testes, certificação e conformidade com normas de saúde e segurança. A falha em atender a esses requisitos pode ter consequências graves para a saúde humana e implicações legais significativas. Isso significa que a inovação neste campo é altamente regulada e exige um nível de evidência e validação muito superior. Engenheiros de materiais que atuam nestes domínios precisam de um conhecimento aprofundado não apenas da ciência dos materiais, mas também de toxicologia, biologia, medicina e do arcabouço regulatório pertinente, promovendo uma abordagem verdadeiramente transdisciplinar.

A menção de "engenharia de tecidos" para biomateriais sugere uma evolução além de implantes passivos. A engenharia de tecidos busca criar estruturas que possam substituir ou reparar tecidos danificados, o que implica que os biomateriais devem ser mais do que inertes; eles precisam ser bioativos, responsivos e capazes de guiar processos celulares. Isso aponta para uma tendência de biomateriais "inteligentes" ou "terapêuticos" que interagem ativamente com o corpo para promover a cura ou entregar fármacos. O futuro dos biomateriais reside na sua capacidade de atuar como plataformas interativas com sistemas biológicos, exigindo pesquisa em materiais responsivos, sistemas de liberação controlada e interfaces material-biológico avançadas.

A criação de materiais seguros para o contato com alimentos e que prolonguem sua vida útil é essencial para a saúde pública e a redução do desperdício de alimentos. Isso envolve o desenvolvimento de embalagens com propriedades de barreira aprimoradas contra gases e umidade, bem como a garantia de que não haja migração de substâncias tóxicas do material para o alimento.

1.5. DIGITALIZAÇÃO

O impacto transformador das tecnologias digitais na engenharia de materiais é inegável. Este domínio explora a aplicação da modelagem computacional para acelerar a descoberta e o projeto de materiais, e a utilização da manufatura aditiva para a produção de componentes com geometrias complexas e propriedades personalizadas.

A utilização de ferramentas de simulação para acelerar o desenvolvimento de novos materiais representa uma revolução na engenharia de materiais. A modelagem computacional permite prever propriedades, simular comportamentos sob diferentes condições e otimizar a composição e estrutura dos materiais *in silico*, reduzindo significativamente o número de experimentos físicos caros e demorados. A modelagem computacional não é apenas uma ferramenta auxiliar; ela representa uma mudança de paradigma do método empírico de "tentativa e erro" para um design de materiais baseado em dados e previsão. A capacidade de "acelerar o desenvolvimento de novos materiais" implica uma redução drástica no tempo e custo de pesquisa e desenvolvimento, permitindo que a indústria responda mais rapidamente às demandas de mercado e aos desafios emergentes. Isso sugere que a digitalização é um fator multiplicador para a inovação em todas as outras áreas da engenharia de materiais. O investimento em infraestrutura computacional e no desenvolvimento de algoritmos avançados, incluindo inteligência artificial e *machine learning*, é fundamental para manter a vanguarda na pesquisa e desenvolvimento de materiais, tornando a engenharia de materiais uma disciplina cada vez mais orientada por dados.

A impressão 3D de componentes com geometrias complexas e propriedades personalizadas está transformando os processos de fabricação. Esta tecnologia permite a criação de peças com designs otimizados que seriam impossíveis de produzir por métodos convencionais, além de possibilitar a fabricação sob demanda e a personalização em massa. A manufatura aditiva e sua capacidade de produzir "geometrias complexas e propriedades personalizadas" vai além da simples fabricação de peças. Ela permite a produção de componentes sob medida para aplicações específicas, desde implantes médicos personalizados até peças otimizadas para aeronaves. Isso tem o potencial de reconfigurar as cadeias de suprimentos, permitindo a fabricação descentralizada e sob demanda, reduzindo estoques e o desperdício, e aumentando a agilidade na resposta às necessidades do mercado. A digitalização, através da manufatura aditiva, está pavimentando o caminho para uma nova era de produção altamente customizada e eficiente, desafiando modelos de negócios tradicionais e promovendo a inovação em design e funcionalidade de produtos.

2. TÓPICOS PARA APROFUNDAMENTO

Além dos desafios primários, existem áreas de estudo complementares que oferecem caminhos promissores para o avanço da engenharia de materiais e a superação dos desafios atuais.

2.1. MATERIAIS AVANÇADOS

A discussão sobre materiais avançados concentra-se em classes de materiais que representam a vanguarda da pesquisa. Os nanomateriais, com suas propriedades únicas em escala atômica e molecular, os materiais compósitos, que combinam diferentes fases para otimizar propriedades, e os materiais inteligentes, capazes de responder a estímulos externos, são cruciais para o desenvolvimento de soluções inovadoras. Os materiais avançados não são apenas tópicos de estudo adicionais; eles representam as soluções científicas e tecnológicas para muitos dos desafios de desempenho, custo e até sustentabilidade. Nanomateriais são essenciais para miniaturização; compósitos oferecem alta resistência com leveza; materiais inteligentes podem ser a base para

biomateriais responsivos ou sistemas de monitoramento. Esta seção, portanto, serve como uma ponte entre os problemas identificados e as direções de pesquisa que prometem resolvê-los. O investimento contínuo em pesquisa fundamental e aplicada sobre essas classes de materiais é imperativo para que a engenharia de materiais possa oferecer as soluções de próxima geração exigidas pela sociedade e pela indústria.

2.2. BIOMIMÉTICA

A biomimética é apresentada como uma abordagem interdisciplinar que busca inspiração na natureza para conceber novos materiais e estruturas. Este campo explora a engenhosidade dos sistemas biológicos, que, através de milhões de anos de evolução, desenvolveram soluções otimizadas para desafios de desempenho, sustentabilidade e eficiência energética. A biomimética oferece um caminho poderoso para abordar os desafios de sustentabilidade e desempenho. Sistemas naturais são inerentemente otimizados para o uso de recursos, eficiência energética e, frequentemente, para a biodegradabilidade ou reciclabilidade (por exemplo, seda de aranha para resistência, efeito lótus para autolimpeza). Essa abordagem sugere que muitas soluções para problemas complexos de engenharia já existem na biologia, mudando o foco de "inventar" para "descobrir" e "adaptar". A promoção da pesquisa interdisciplinar entre a engenharia de materiais, a biologia e a ecologia pode desbloquear inovações em materiais que são simultaneamente de alto desempenho e ambientalmente benignos, superando as limitações dos métodos sintéticos convencionais.

2.3. ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é definida como um conceito que visa minimizar o desperdício e maximizar a reutilização de materiais. Este modelo sistêmico busca manter os materiais em uso pelo maior tempo possível, através de estratégias de design para durabilidade, reparo, reutilização e reciclagem, contrastando com o modelo linear tradicional. A economia circular não é apenas um tópico para aprofundamento; ela é o arcabouço estratégico que unifica e dá propósito a muitos dos desafios de sustentabilidade (materiais biodegradáveis, reciclagem, consumo de energia) e influencia até mesmo os desafios de custo. Ela representa uma mudança fundamental na forma como os materiais são concebidos e utilizados – não como bens de consumo descartáveis, mas como recursos valiosos a serem mantidos em circulação. Isso implica que a engenharia de materiais deve projetar produtos e processos com o "fim da vida" em mente, desde o início. Engenheiros de materiais são cada vez mais chamados a projetar materiais e produtos que se encaixem em um modelo de economia circular, exigindo uma compreensão holística das cadeias de valor, dos cenários de fim de vida e das implicações políticas e regulatórias.

3. CONCLUSÃO

A engenharia de materiais contemporânea é definida por um conjunto de desafios multifacetados, abrangendo a sustentabilidade, o desempenho, o custo, a saúde e segurança, e a digitalização. Cada um desses domínios apresenta complexidades intrínsecas, mas sua interconexão exige uma abordagem integrada para o desenvolvimento de soluções eficazes. A análise detalhada dos desafios revela que a engenharia de materiais não é apenas uma área técnica especializada, mas uma disciplina

estratégica que subjaz à capacidade de uma sociedade ou nação de enfrentar grandes desafios globais. Problemas como as mudanças climáticas, a segurança energética, a saúde pública e a competitividade industrial dependem intrinsecamente das inovações em materiais.

A capacidade de superar esses desafios não é meramente uma questão de avanço científico, mas uma necessidade premente para o progresso global. A engenharia de materiais é fundamental para a transição para uma economia mais sustentável, para a inovação em setores de alta tecnologia, para a garantia da saúde pública e para a otimização de recursos. A capacidade de inovar em materiais é, portanto, um indicador-chave da resiliência e do potencial de crescimento de uma economia.

As áreas de aprofundamento, como materiais avançados, biomimética e economia circular, indicam os caminhos promissores para a pesquisa e o desenvolvimento, sinalizando que a disciplina continuará a ser um motor essencial de inovação e transformação. O investimento contínuo e coordenado em pesquisa, desenvolvimento e formação de recursos humanos em engenharia de materiais é um imperativo estratégico para governos e indústrias que buscam liderar a inovação e garantir um futuro sustentável. O sucesso na engenharia de materiais é, portanto, um pilar para a construção de um futuro mais resiliente, eficiente e equitativo.

REFERÊNCIAS

Trata-se de um artigo opinativo.

CAPÍTULO

08 Fatores que afetam a concentração crítica de suspensões

Resumo: Devido à sua importância em vários campos da indústria, estudos sobre o comportamento reológico de suspensões concentradas têm sido realizados e publicados anualmente em um ritmo cada vez maior. No sentido reológico, uma suspensão é considerada concentrada quando há uma mudança acentuada na variação da viscosidade da suspensão com a concentração de partículas dispersas. Essa mudança de comportamento, em geral, é devido à formação de aglomerados de partículas a partir de uma concentração chamada crítica. Neste artigo, os principais fatores que afetam a concentração crítica de suspensões cujo meio de dispersão é newtoniano são apresentados de forma pioneira.

1. INTRODUÇÃO

Numerosos trabalhos já foram publicados sobre a reologia de suspensões concentradas, especificamente sobre o efeito da concentração na viscosidade de suspensões diluídas, o que torna uma atividade irreal tentar resumi-los em uma revisão ou artigo curto [1-10]. O trabalho pioneiro de Einstein [11] gerou a famosa equação que relaciona a viscosidade específica, η_{sp}, de uma suspensão altamente diluída com a concentração da fase dispersa. Para que essa relação (Eq. 1) seja verificada, não deve haver contato entre quaisquer duas partículas da fase dispersa em um meio Newtoniano. Portanto, dificilmente será possível observar uma suspensão Einsteiniana na prática.

$$\eta_{sp} = 2{,}5\phi \qquad (1)$$

onde ϕ é $fração\ volumétrica\ de\ partículas$; $\eta_{sp} = \eta_r - 1\ and\ \eta_r = \eta_{sus}/\eta_{dm}$.

Em parte, isso se deve a alguns requisitos do modelo de Einstein, notadamente a exigência de uma partícula esférica, rígida e inerte e, acima de tudo, a não ocorrência de contatos ou choques entre partículas que ocorrem devido ao movimento Browniano das partículas dispersas no meio de dispersão (*dm*). Esse movimento leva a efeitos hidrodinâmicos que tornam o movimento de uma partícula dependente do movimento de partículas vizinhas [12]. O que realmente acontece é que a viscosidade específica da solução de suspensão aumenta com a concentração da fase dispersa de forma linear, às vezes tenuamente, mas com uma inclinação muito maior que 2.5, como proposto por Einstein. Além disso, mesmo em baixas concentrações, uma suspensão é considerada concentrada se houver uma mudança brusca na inclinação na curva de viscosidade x concentração. Na reologia de suspensões, a concentração crítica é definida como aquela a partir da qual a relação linear entre a viscosidade da suspensão e a concentração da fase dispersa muda abruptamente de inclinação. Em geral, se a suspensão em concentrações iniciais é newtoniana, ela assume comportamentos não-Newtonianos dependentes e/ou independentes do tempo [13].

Uma vez que as suspensões e seus usos são muito importantes em vários campos industriais, é necessário conhecer os fatores que podem levar a atingir a concentração crítica, pois o aumento acentuado da viscosidade aparente da suspensão após esse ponto pode levar a complicações nos processos de preparação, armazenamento e uso da suspensão.

2. EFEITO DO PROCESSO DE DIFUSÃO E VISCOSIDADE DO MEIO DE DISPERSÃO

De acordo com a relação de Debye-Stokes-Einstein [14], Eq. 2, quanto maior a viscosidade do meio de dispersão, menor o coeficiente de difusão nesse meio.

$$\eta_{sp} = 2{,}5\phi \qquad (2)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, r é o raio da partícula em μm, e ν is a viscosidade cinemática, em cSt, do meio de dispersão (*md*).

Se compararmos os valores para a concentração crítica de partículas de alumina hidratada em dois fluidos de polidimetilsiloxano, com diferentes viscosidades cinemáticas

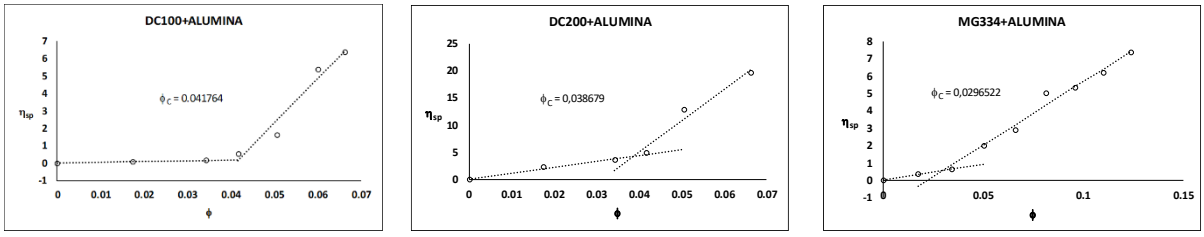
(ver Tabela 1 e Figuras 1a-c), observa-se que o processo de difusão não é o único que governa a aglomeração de partículas em suspensão.

Para um aumento de 100% na viscosidade do meio de dispersão, correspondendo neste caso a uma redução pela metade no coeficiente de difusão, houve uma diminuição de apenas cerca de 9% no valor da concentração crítica.

Figura 1. a) Efeito da concentração de alumina na viscosidade aparente da suspensão em DC100 [15,16] e b) em fluidos PDMS DC200 [15,16] e em óleo MG334 [17].

Tabela 1. Concentração crítica de suspensões de Alumina Hidratada em dois fluidos PDMS com diferentes viscosidades. [15-17]

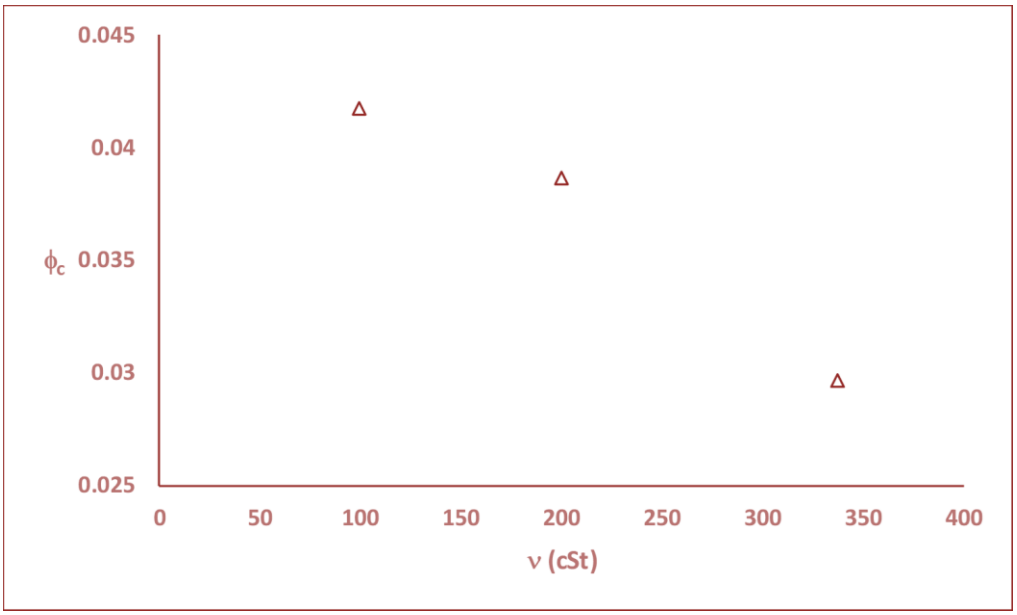
Meio de Dispersão	Viscosidade Cinemática (cSt)	Raio da Partícula (mm)	Concentração Crítica (g/dl)	Observaçõ es
DC100	100	0.0435	0.8667	0.96
DC200	200	0.03969	0.8667	0.97



(a) (b) (c)

No entanto, a Equação DSE é baseada na difusão de uma única partícula em um meio líquido, ou seja, refere-se ao movimento Browniano dessa partícula em um meio Newtoniano. No caso em que há mais de uma partícula, a chamada difusão coletiva é levada em consideração, a interação entre as partículas deve ser considerada e não apenas a interação partícula-fluido. Nesse caso, o coeficiente de difusão torna-se dependente da concentração e a atração entre as partículas leva a uma diminuição no coeficiente de difusão. Isso leva a um processo de aglomeração acima da concentração crítica [5]. Portanto, uma modificação da equação DBE é necessária para enfatizar mais o efeito da viscosidade do meio de dispersão.

Figura 2. Efeito da viscosidade cinemática do meio de dispersão na concentração crítica de suspensões de Alumina em vários fluidos Newtonianos. Dados extraídos das Figuras 1a-c.



Como pode ser visto na Figura 2, a relação entre a concentração crítica e a viscosidade do meio de dispersão não é linear, como previsto para suspensões altamente diluídas e pela Equação DBE. No entanto, é claro que, para o mesmo conjunto de partículas, quanto maior a viscosidade do meio de dispersão, menor o número de partículas para que os aglomerados se formem e a concentração crítica seja atingida.

3. EFEITO DO PROCESSO DE ADESÃO ENTRE PARTÍCULAS

Definindo F como a força necessária para separar duas partículas, como mostrado na Figura 3, Bradley [18] propôs que para partículas esféricas e rígidas:

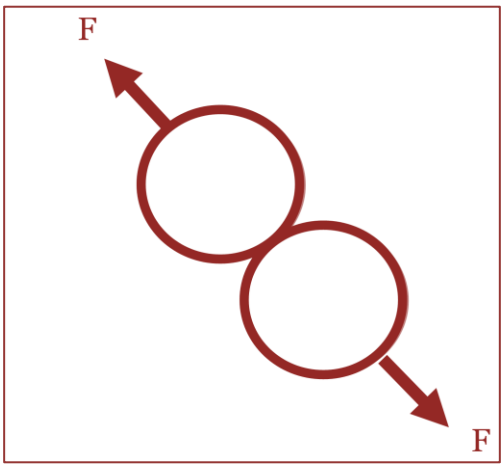
$$F = \frac{\pi W d}{2} = \pi W r \qquad (3)$$

onde W é o trabalho de adesão derivado da soma das forças de Van der Waals para todas as moléculas nas duas partículas, que é obtido da Eq. (4):

$$F_{ad} = F_{vdw} + F_e + F_c \qquad (4)$$

onde F_e é a força eletrostática, F_c é a força capilar e F_{vdw} é a força de Van der Waals.

Figura 3. Força necessária para separar duas partículas aderidas.



A força eletrostática é 10 vezes menor que a força de Van der Waals [19], tendo apenas o papel de aglomerar as partículas. A força capilar, que depende da tensão superficial entre os corpos, surge da umidade entre as partículas, de modo que materiais hidrofílicos porosos frequentemente contêm umidade incorporada nos poros que podem construir pontes líquidas nas superfícies aderidas [20].

A adesão entre as partículas influencia a força dos aglomerados de partículas, com uma dependência linear entre a força do aglomerado e o diâmetro da partícula da seguinte forma:

$$F_{ad} = \frac{3\pi W d}{8} = \frac{3}{4}\pi W r \qquad (5)$$

comparando as Eqs. (4) e (5) temos:

$$F_{ad} = \frac{3}{4}F \qquad (6)$$

que resulta na força para separação entre duas partículas, F, sendo 4/3 da força que as mantém aderidas, F_{ad}. Isso sugere que, para alguns sistemas partícula-fluido, embora existam aglomerados de partículas e, portanto, um aumento na viscosidade da suspensão com a concentração, pode ser difícil observar comportamentos não-Newtonianos, como pseudoplasticidade e tixotropia, já que a força necessária para separar as partículas é muito superior à de mantê-las juntas. Assim, foi mais fácil observar pseudoplasticidade em suspensões de alumina do que de atapulgita em poliéster, devido ao fato de as partículas de atapulgita terem um diâmetro médio de aproximadamente 1,2 μm, enquanto as partículas de alumina têm um diâmetro médio de 0,87 μm.

4. EFEITOS COMBINADOS DA ADESÃO DE PARTÍCULAS E RIGIDEZ MOLECULAR DO MEIO DE DISPERSÃO POLIMÉRICO

Para o caso mencionado acima e para meios de dispersão com cadeias moleculares rígidas, propusemos [20], com base no modelo de reptação de De Gennes [21], um modelo que relaciona a dependência da concentração do comportamento reológico de suspensões altamente concentradas com a mobilidade de cadeias poliméricas, onde:

$$\eta_s = \eta_p c \left[\frac{1}{2kTf_v\rho}\left(\frac{X_s^2}{m_s} - \frac{X_p^2}{m_p}\right)\right] \qquad (7)$$

onde: *s* and *p* indicam suspensão and polímero, respectivamente, e

η - viscosidade aparente (Pa.s)

k – constante de Boltzmann (N/m.K)

T – absolute temperature (K)

ρ - densidade das partículas (g/cm^3)

f_v – fator volumétrico = volume das partículas/volume do polímero

c – teor de partículas (g/dl)

X – distância média de deslocamento das cadeias entre os obstáculos (m)

m – mobilidade da cadeia (m/s.N)

Uma vez que a determinação experimental das quantidades X, E e m is very difficult, a new parameter, called motion perturbation number, $\psi = X^2E/m$, é muito difícil, um novo parâmetro, denominado número de perturbação do movimento, deve ser introduzido na Eq. (7). Assim, temos:

$$\eta_s = \eta_p c \left[\frac{1}{2kTf_v\rho}\left(\psi_s - \psi_p\right)\right] \qquad (8)$$

Se fizermos $\left[\frac{1}{2kTf_v\rho}\left(\psi_s - \psi_p\right)\right] = \alpha$, onde α (Pa.s.dl/g) é uma constante que representa o efeito das partículas no aumento da viscosidade aparente da suspensão. Como α é independente da concentração das partículas, a razão:

$$\left(\psi_s - \psi_p\right)\Big/_{f_v\rho} = \xi$$

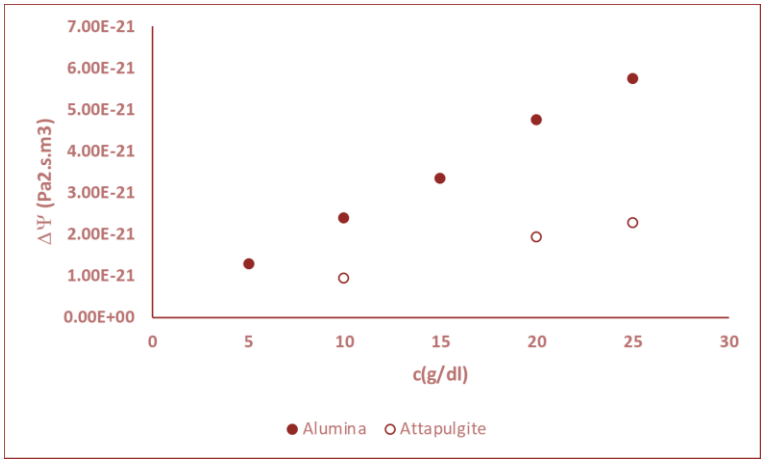
deve ser constante para todas as concentrações de partículas na suspensão em cada temperatura de análise. Isso deve ocorrer mesmo que:

$$\Delta\psi = \psi_s - \psi_p$$

chamado grau de perturbação, aumente à medida que c aumenta (ver Figura 3). Introduzindo α, ξ e $\Delta\psi$ na Eq. (8) temos:

$$\eta_s = \eta_p + \frac{\xi}{2kT}c \qquad (9)$$

Figura 4. Influência da concentração de partículas na viscosidade aparente da suspensão em resinas de poliéster [20].



Isso indica que, para sistemas com alta força de adesão entre as partículas dispersas em um meio Newtoniano rígido, a viscosidade da suspensão aumenta linearmente com a concentração das partículas, sem mudança brusca de inclinação observada na curva de viscosidade x concentração nem o surgimento de comportamentos não-Newtonianos. Isso é válido para uma concentração da fase sólida que permite que a suspensão ainda seja considerada um fluido.

Para dispersão de alumina (variando de 5 a 25 g/dl) e atapulgita (10 a 25 g/dl) em poliéster, descobrimos que $\xi = 2{,}36 \pm 0{,}11x10^{-22}Pa^2.s.m^6/Kg$ para o primeiro, e $\xi = 9{,}37 \pm 0{,}25x10^{-22}Pa^2.s.m^6/Kg$ para o segundo sistema [20]. A diferença nos valores de a foi atribuída à razão densidade das partículas pela viscosidade do meio de dispersão, quanto maior essa razão, maior o valor de ξ

5. CARREGAMENTO MÁXIMO POSSÍVEL

A possibilidade de ocorrência de aglomeração de partículas na fase dispersa de uma suspensão, relacionada às interações partícula-partícula, exigiu o desenvolvimento do conceito de carregamento máximo possível para que o sistema ainda possa ser considerado um fluido.

Teorias iniciais [22] apontam que o carregamento efetivo é dado por:

$$\Phi = \frac{2{,}5\phi}{1-\left(\frac{\phi}{\phi^*}\right)} \qquad (10)$$

com $\lim_{\phi \to 0} \Phi = 2{,}5\phi$ e $\lim_{\phi \to \phi^*} \Phi = \infty$.

Tabela 2. Relação entre ϕ^* e a forma e o epacotamento das partíclas[22].

Forma	Empacotamento	ϕ^* teórico	ϕ^* experimental
esférica	hexagonal/CCC	0,74	0,5 – 0,7
	Aleatório fechado	0,637	
cilíndrica	hexagonal	0,907	0,5 – 0,7
	Alaeatório paralelo	0,500	

Segundo Navarro [3], o significado físico de ϕ^* é o da concentração correspondente ao maior grau de carregamento que pode ser imposto ao sistema para que ele ainda possa fluir. ϕ^* está relacionado à forma da partícula e à maneira como ela se empacota durante a aglomeração. Na Tabela 2, você pode encontrar alguns desses valores. Dados experimentais apontam para $0{,}5 < \phi^* < 0{,}7$. Na literatura [12], vários modelos teóricos podem ser encontrados que utilizam o conceito de carregamento, Φ, como o de Eilers, Eq. (11), e Mooney, Eq. (12), para partículas esféricas e Fedors, Eq. (13), para partículas cilíndricas.

$$\eta_r = \left(1 + \frac{\Phi}{2}\right)^2 = \left(1 + \frac{1{,}25\phi}{1-\phi^*}\right) \qquad (11)$$

$$\eta_r = e^{(1+\Phi)} = 1 + \frac{2{,}5\phi}{1-\phi^*} \qquad (12)$$

$$\eta_r = \left(1 + \frac{1{,}25\phi}{\phi^*-\phi}\right)^2 \qquad (13)$$

6. EFEITO DA FORMA E ORIENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Como visto anteriormente, a forma das partículas impacta a relação entre a viscosidade da suspensão e o carregamento máximo possível. Portanto, é importante conhecer o efeito da forma e da reintegração das partículas no comportamento reológico da suspensão. Embora algumas partículas sejam esféricas ou aproximadamente esféricas, algumas partículas importantes usadas em sistemas dispersos assumem a forma de placas, discos, bastões e óvulos que induzem um certo grau de anisotropia no sistema, modificando o comportamento reológico desse sistema.

De acordo com Suh & White [23], partículas em forma de disco aumentam a viscosidade da suspensão de forma mais acentuada à medida que o tamanho das partículas diminui, especialmente na região de baixo cisalhamento. Assim, para a mesma concentração de partículas da mesma natureza e formas diferentes, uma suspensão de partículas em forma de disco atingirá a concentração crítica em níveis mais baixos do que seria necessário para partículas esféricas do mesmo volume.

Partículas semelhantes a fibras, cilindros, bastões, etc., teoricamente, quando isoladas, movem-se rotacionalmente em um fluxo Newtoniano de acordo com a órbita de Jeffery [24]. Esse tipo de órbita se assemelha ao movimento de um disco vibrando em uma superfície plana. Antes da concentração crítica, nesse tipo de órbita, o contato fibra-fibra é mais raro, embora o efeito hidrodinâmico seja mais presente do que se a partícula fosse esférica na mesma concentração. No entanto, haverá um cisalhamento não muito alto a partir do qual as fibras saem dessa órbita, o contato fibra-fibra se torna predominante e as fibras desenvolverão um movimento espiral em direção ao vórtice produzido pelo

cisalhamento, em um movimento rotacional em um meio de dispersão Newtoniano. Assim, a viscosidade aparente da suspensão aumentará muito mais na mesma concentração de fibra à medida que a razão comprimento/diâmetro da partícula aumenta, como Malkin mostrou em um trabalho pioneiro sobre este assunto [25].

7. CONCLUSÕES

Vários fatores afetam a concentração crítica de suspensões cujo meio de dispersão é newtoniano. Fatores que influenciam o processo de difusão isotérmica, como o diâmetro da partícula e a viscosidade cinemática do meio de dispersão, atuam no sentido de que quanto maior a partícula e maior a viscosidade do meio de dispersão, menor o valor da concentração crítica devido à maior possibilidade de aglomeração de partículas quando esses dois fatores são aumentados. No entanto, para a mesma viscosidade do meio de dispersão, partículas menores formarão aglomerados mais resistentes, tornando a viscosidade aparente da suspensão maior e mais resistente ao cisalhamento. Suspensões cujo meio de dispersão é fortemente newtoniano e com cadeias poliméricas rígidas são menos suscetíveis à formação de aglomerados de partículas no espaço intercadeias, mantendo o caráter Newtoniano da suspensão em altas concentrações de partículas. Partículas com uma razão L/d >> 1.0 tendem a induzir comportamento não-Newtoniano em concentrações mais baixas do que as partículas correspondentes com L/d = 1, com a viscosidade da suspensão aumentando mais com a concentração à medida que L/d se afasta da unidade.

REFERÊNCIAS

[1] ILYN, S. O.; MALKIN, A. Y.; KULICHIKIN, V. G. Rheological peculiarities of concentrated suspensions. **Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS**, [s.l.], v. 29, 2011.

[2] AVARMAND, S. et al. Rheological properties of concentrated aqueous silica suspensions: Effects of pH and ions content. **Journal of Rheology**, [s.l.], v. 47, p. 1133, 2003. DOI: 10.1122/1.1603237.

[3] THANPITCHA, T. et al. Anomalous rheology of polypyrrole nanoparticle/alginate suspensions: effect of solids volume fraction, particle size, and electronic state. **Rheologica Acta**, [s.l.], v. 50, p. 809–823, 2011. DOI: 10.1007/s00397-011-0566-x.

[4] THOMAS, J. E. et al. **Microscopic origin of frictional rheology in dense suspensions: correlations in force space**. [S. l.]: Academia.edu, [20--?]. Disponível em: https://www.academia.edu/40017390/Microscopic_origin_of_frictional_rheology_in_dense_suspensions_correlations_in_force_space. Acesso em: 29 jul. 2025.

[5] BARTHELMES, G.; HEINE, M. C.; PRATSINIS, S. E. A Simple Model for the Rheology of Concentrated Aggregating Suspensions. **Chemie Ingenieur Technik**, [s.l.], v. 75, n. 8, 2003.

[6] MARTI, I. et al. Rheology of concentrated suspensions containing mixtures of spheres and fibres. **Rheologica Acta**, [s.l.], v. 44, p. 502–512, 2005. DOI: 10.1007/s00397-005-0432-9.

[7] NAZOCKDAST, E.; MORRIS, J. F. Microstructural theory and the rheology of concentrated colloidal suspensions. **Journal of Fluid Mechanics**, [s.l.], v. 713, p. 420–452, 2012.

[8] STUDART, A. R. et al. Rheology of Concentrated Suspensions Containing Weakly Attractive Alumina Nanoparticles. **Journal of the American Ceramic Society**, [s.l.], v. 89, n. 8, p. 2418–2425, 2006.

[9] HOLEK, S-M.; MENDOZA, C. I. The rheology of concentrated suspensions of arbitrarily-shaped particles. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], p. 1–28, 2010.

[10] VAART, K. et al. Rheology of concentrated soft and hard-sphere suspensions. **Journal of Rheology**, [s.l.], v. 57, p. 1195, 2013. DOI: 10.1122/1.4808054.

[11] EINSTEIN, A. Eine neue bestimmung der muleküldimensionen. **Annalen der Physik**, [s.l.], v. 19, p. 289, 1906.

[12] NAVARRO, R. F. **Fundamentos de Reologia de Polímeros**. Caxias do Sul: EDUCS, 1997.

[13] NAVARRO, R. F. **Simultaneous time dependent and independent rheological behaviors of alumina suspensions in polydimethylsiloxane**. [S. l.]: Academia.edu, [20--?]. Disponível em: https://www.academia.edu/109253086. Acesso em: 29 jul. 2025.

[14] MILLER, C. C. The Stockes-Einstein law for diffusion in solution. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], p. 724–749, 1924.

[15] NAVARRO, R. F.; ALSINA, O. L. S. Influence of alumina concentration on the rheological properties of alumina suspensions in PDMS. Part I: Pseudoplasticity. **RBE**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 63–77, 1991.

[16] NAVARRO, R. F.; ALSINA, O. L. S. Influence of alumina concentration on the rheological properties of alumina suspensions in PDMS. Part II: Anti-thixotropy. **RBE**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 79–91, 1991.

[17] LIMA, G. G. C.; ALSINA, O. L. S.; NAVARRO, R. F. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF TRANSPORT PHENOMENA IN MANUFACTURING PROCESS, 7., 1994, Acapulco. **Proceedings...** Acapulco, 1994. p. 74–83.

[18] BRADLEY, R. S. The Cohesive Force Between Solid Surfaces and the Surface Energy of Solids. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, [s.l.], p. 853–862, 1932. DOI: 10.1080/14786449209461990.

[19] KENDALL, K.; STAINTON, C. Adhesion and aggregation of fine particles. **Powder Technology**, [s.l.], v. 121, p. 223–229, 2001. DOI: 10.1016/S0032-5910(01)00386-2.

[20] NAVARRO, R. F. Appliction of Navarro rheological model to polyester-attapulgite polyester-alumina composites in a liquid state. In: FPCM-4, 4., 1996, Aberystwyth, UK. **Proceedings...** Aberystwyth, UK, 1996. p. 9–11.

[21] DE GENNES, P. G. **Introduction to Polymer Dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[22] VINOGRADOV, G. V.; MALKIN, A. Y. **Rheology of Polymers**. Moscow: Mir Publisher, 1980.

[23] SUH, C. H.; WHITE, J. L. Talc-thermoplastic compounds: particle orientation in flow and rheological properties. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [s.l.], v. 62, p. 175–206, 1996.

[24] JEFFERY, G. B. The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, [s.l.], v. 102, p. 161.

[25] MALKIN, A. Y.; EPPLÉ, G. V.; GRITSUK, A. L. Kolloid Zhurn, [s.l.], v. 34, p. 550–562, 1972.

CAPÍTULO

09 Relação entre índice de fluidez e viscosidade aparente de polímeros pseudoplásticos

Resumo: Este capítulo apresenta uma proposta para relacionar o índice de fluidez do material com parâmetros reológicos, como a viscosidade aparente, levando em consideração sua dependência da taxa de deformação por cisalhamento. Os resultados obtidos para o polipropileno, que é pseudoplástico, provaram que o modelo proposto é adequado, ajustando-se com precisão aos dados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

Quando Oakes criou o índice de fluidez (*MFI*), ele estava interessado apenas em desenvolver um parâmetro ou um índice que fornecesse informações sobre a processabilidade e qualidade do polietileno produzido pela ICI (1). Atualmente, o *MFI* é padronizado por ASTM e DIN e é um método amplamente utilizado com o objetivo inicial, mas para todos os polímeros termoplásticos. Por ser uma medida simples, o *MFI* é frequentemente usado como o único parâmetro para determinar as condições de processamento de um polímero termoplástico, dado que as funções reológicas necessárias dependem de equipamentos caros. Alguns trabalhos foram publicados relacionando o *MFI* indiretamente com propriedades como massa molar (1) e variáveis de extrusão (2), e diretamente com a vazão volumétrica (1,3).

A relação entre *MFI* e taxa de fluxo volumétrico é direta, uma vez que o *MFI*, dado em g/10 min, é uma medida da vazão mássica, e é fácil convertê-lo em vazão volumétrica, Q, em cm^3/s, da seguinte forma:

$$MFI = \alpha \rho Q \qquad (1)$$

onde α é o fator de conversão de cm^3/s para g/10 min, e ρ é a densidade dada em g/cm^3.

Métodos que tentam relacionar o *MFI* com as variáveis reológicas mais importantes falham ao considerar a viscosidade do polímero, η, como sendo newtoniana. Isso é visto na proposição de Brenner (1), que, usando a equação de Hagen-Poiseuille para fluidos Newtonianos em capilares, propôs que:

$$Q = \pi \Delta P R^4 / 8 \mu l \qquad (2)$$

onde μ é a viscosidade Newtoniana, ΔP é o gradiente de pressão, em Pa/m, R é o raio do capilar, em m. Combinando Eq.(1) e Eq. (2) resulta em

$$MFI = \frac{\alpha \rho \Delta P R^4}{8 \mu l} \qquad (3)$$

A Eq. (3) é chamada de modelo de Brenner. No entanto, poucos polímeros, mesmo em solução diluída, têm viscosidade no estado de fusão independente da taxa de deformação, $\dot{\gamma}$. Mesmo sob taxas de deformação muito baixas. MFI (MFIe), a maioria dos polímeros termoplásticos tem sua viscosidade profundamente alterada devido à pseudoplasticidade, sendo conveniente usar o termo viscosidade aparente, η, como é o caso verificado dentro do equipamento M, que depende da taxa de deformação. Por essa razão, a taxa de fluxo volumétrico de fluidos pseudoplásticos em capilares é muito maior do que a prevista pela equação de Hagen-Poiseuille (Eq. (2)). Assim, os dados experimentais de *MFI* apresentam valores significativamente diferentes daqueles produzidos pela Eq. (3), especialmente se o índice de potência, n, presente na Eq. (3.4) se afastar do valor unitário para a totalidade dos polímeros fundidos.

Quase todos os polímeros não obedecem à Lei de Newton para a viscosidade, $\tau = \mu\dot{\gamma}$, e seguem a Lei de Potência de Ostwald vista na Eq. (4).

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \qquad (4)$$

onde k = $\eta\dot{\gamma}^{1-n}$ é o índice de consistência, geralmente dado em Pa.s^n e $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ é a viscosidade aparente em Pa.s, τ é a tensão de cisalhamento em Pa e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação em s^{-1}. A solução para a vazão volumétrica de fluidos de lei de potência em capilares, de acordo com Navarro (4,5), é mostrada na Eq. (5).

$$Q = \frac{n}{3n+1}\pi R^3 \left(\frac{R\Delta P}{2kl}\right)^{1/n} \quad (5)$$

Comparando as Eqs. (1) e (5), obtém-se a relação entre *MFI* e *Q* para fluidos da lei de potência dada por:

$$MFI = \alpha\rho \frac{n}{3n+1}\pi R^3 \left(\frac{R\Delta P}{2kl}\right)^{1/n} \quad (6)$$

ou

$$MFI = \alpha\rho \frac{n}{3n+1}\pi R^3 \left(\frac{R\Delta P}{2\eta\dot{\gamma}^{1-n}l}\right)^{1/n} \quad (7)$$

A Eq. (7) pode ser usada para qualquer taxa de deformação.

Embora a lei de potência falhe em regiões em que $\dot{\gamma} \to 0$ e $\dot{\gamma} \to \infty$, e, portanto, não forneça resultados precisos para a viscosidade aparente em ambas as regiões,η0 e η∞, respectivamente, é possível derivar uma expressão analítica para a dependência η($\dot{\gamma}$) que satisfaça as condições de valores finitos para η($\dot{\gamma}$) quando $\dot{\gamma} \to 0$ e $\dot{\gamma} \to \infty$, assumindo que na faixa intermediária para η($\dot{\gamma}$), isto é, $0 \leq \dot{\gamma} \leq \infty$, se segue a Eq. (3.4). De acordo com Vinogradov e Malkin (4),

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{(1+k\dot{\gamma}^n)} \quad (8)$$

Como, para a maioria dos polímeros, $\eta_\infty \ll \eta_0$, a Eq. (8) se reduz a

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{(1+k\dot{\gamma}^n)} \quad (3.9)$$

Substituindo as Eqs. (4) e (9) na Eq. (7), obtém-se:

$$MFI = \alpha\rho \frac{n}{3n+1}\pi R^3 \left(\frac{R\Delta P(1+\tau)}{2\eta_0\dot{\gamma}^{1-n}l}\right)^{1/n} \quad (10)$$

que relaciona *MFI* a η e fornece resultados satisfatórios, desde que a temperatura, tensão de cisalhamento e taxa de deformação aplicadas tanto ao reômetro capilar quanto ao MFIe sejam as mesmas. Para reômetros ou escoamento com outra geometria, são válidas as seguintes expressões:

1) Reômetro de fenda retangular

$$MFI = \alpha\rho \frac{2wB^2}{m+2}\left(\frac{\Delta PB}{kl}\right)^m \quad (11)$$

com $m = 1/n$, B é a metade da altura da fenda e w é a largura da fenda;

2) Reômetro cilíndrico coaxial de geometria anular com movimento linear do cilindro interno

$$MFI = \alpha\rho \frac{2\pi R^2}{r^{1-m}-1}\left[\frac{(1-r^{3-m})}{3-m} - \frac{1-r^2}{2}\right] \quad (12)$$

com R = raio do cilindro externo, r = raio do cilindro interno.

3) Duto circular com ângulo de convergência φ

$$MFI = \alpha\rho\left\{\frac{\pi r_-^2}{m+3}\left[\frac{\Delta P r_-}{2\eta\dot{\gamma}^{1-n}}\right]^m \left[\frac{3(\varphi-1)}{m(1-\varphi^2)}\right]^m\right\} \quad (13)$$

com r_- sendo o raio menor do duto convergente.

4) Escoamento radial entre dois discos paralelos

$$MFI = \alpha\rho \frac{4\pi n}{2n+1}\left[\frac{(1-n)(P_i-P_2)}{\eta\dot{\gamma}^{1-n}\left(r_s^{1-n}-r_i^{1-n}\right)} h^{2n+1}\right]^m \quad (14)$$

com os índices i e s indicando raio da região cilíndrica de entrada do fluido e dos discos paralelos, respectivamente, e h é a metade da distância entre os dois discos.

Essas geometrias com Eqs. (11) a (14) não serão objeto de tratamento neste trabalho.

De acordo com Michaeli (6), os valores médios de $\dot{\gamma}$ e τ nos MFIe são dados por:

$$\dot{\gamma}_{MFI} = \frac{MFI}{\alpha\rho R_m^3} \quad (15)$$

e

$$\tau = \frac{R_m}{8R_c^2 l_m} F \quad (16)$$

em que os índices m e c se referem à matriz e ao cilindro, respectivamente, e F é a força aplicada para promover a extração do polímero. *MFI* é dado em g/10 min. Os valores fornecidos pelas Eqs. (15) e (16) devem ser ajustados para uso no reômetro capilar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O polímero utilizado foi o polipropileno fornecido pela Polibrasil (Camaçari, Bahia, Brasil) conforme veio do fabricante, com densidade de 0,758 g/cm^3 e índice de fluidez de 3,39 g/10 min, medido a 190°C.

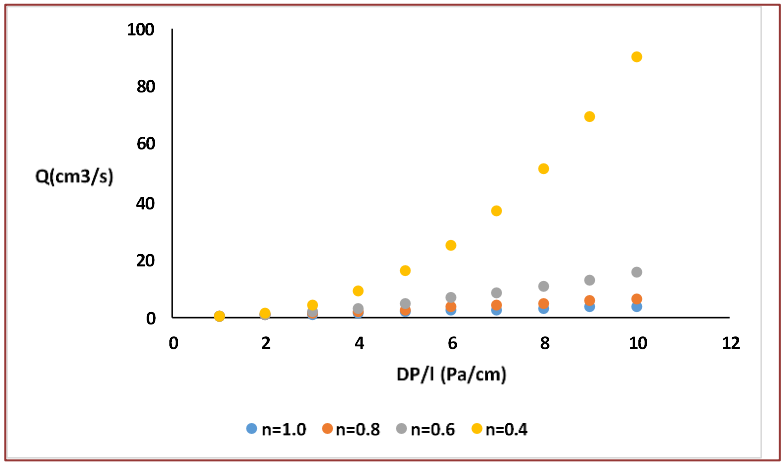
As medições do índice de fluidez foram feitas em um MFIe padrão com diâmetro de cilindro, d_c de 9,474 mm, diâmetro da matriz, d_m de 2,0955 mm e comprimento da matriz, l_m de 8,0 mm e razão l/d de cerca de 4,0. A distância percorrida pelo pistão foi de 25,0 mm e a força aplicada, F, foi de 5,0 Kgf. A temperatura de operação foi de 190°C.

Para outras taxas de deformação e relações *l/d*, foi usado um reômetro HAAKE SYSTEM 90, com uma extrusora de parafuso único, e a temperatura em todas as regiões da extrusora fixada em 190°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mostrado na Tabela 1, os resultados obtidos com as Eqs. (1) e (2) apresentaram grande discrepância com os resultados experimentais, devido não levar em consideração o índice de lei de potência, *n*, da amostra a uma temperatura de 190°C.

Figura 1. Influência do índice da potência, *n*, na vazão volumétrica, *Q*, em função do gradiente de pressão, ΔP.



Conforme mostrado na Figura 1, à medida que $n \rightarrow 0$, afastando-se do valor unitário, os valores da vazão volumétrica, Q, medidos para $0 < l/d \leq 10{,}0$ e no mesmo gradiente de pressão, afastam-se muito do valor calculado para um fluido newtoniano. O modelo proposto neste trabalho se mostra adequado, produzindo valores compatíveis para $0 \leq n \leq 1$.

Tabela 1. Valores experimentais do MFI e aqueles obtidos pelas Eqs. (3) e (10).

l/d	*MFI* Eq. (3) (g/10min)	*MFI* Eq. (10) (g/10min)	*MFI* EXP(g/10min)
4.0	0.328	3.580	3.500
6.0	0.062	0.410	0.420
8.0	0.020	0.099	0.100
10.0	0.008	0.032	0.032

4. CONCLUSÃO

Dados experimentais mostram que o modelo proposto neste trabalho se ajusta perfeitamente aos dados experimentais, tornando-o adequado para correlacionar a relação entre MFI e viscosidade aparente sob gradiente de temperatura e pressão constante para qualquer índice de lei de potência, $0 < n < 1{,}0$, e razão l/d.

REFERÊNCIAS

[1] BRENNER, A.R. J. Appl. Polym. Sci., v. 51, p. 1234-1241, 1992.

[2] BELOTTI, P.; CARVALHO, A.B.M. Anais do I CBPOL, v. 2, p. 717-721, 1991.

[3] VINOGRADOV, G.V.; MALKIN, A. Ya. Rheology of Polymers. Moscow: Mir Publishers, 1980.

[4] NAVARRO, R. F. Fundamentos de Reologia de Polímeros. Caxias do Sul: EDUCS, 1997.

[5] NAVARRO, R.F. Mecânica dos Biomateriais. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

[6] MICHAELI, W. Extrusion Dies. Munich: Hansen Publishers, 1982.

CAPÍTULO

10 A Lei de Newton para a viscosidade e o surgimento da reologia

Resumo: O estudo do escoamento de fluidos, desde a Lei de Newton para a viscosidade no século XVII, que descrevia o atrito interno em fluidos sob tensão de cisalhamento, evoluiu significativamente com o surgimento da reologia no século XX, impulsionada pela industrialização e a manipulação de substâncias complexas. A viscosidade de um fluido quantifica sua resistência à deformação. Enquanto a lei de Newton se aplica a fluidos newtonianos, como água e ar, nos quais a viscosidade é constante, muitos fluidos, chamados não newtonianos, desviam-se desse comportamento. A reologia, formalizada por Eugene C. Bingham e Markus Reiner, estuda a deformação e o escoamento da matéria em todas as suas formas, incluindo comportamentos como viscoplasticidade (que exige uma tensão mínima para escoar), pseudoplasticidade (viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação), dilatância (viscosidade aumenta com a taxa de deformação) , tixotropia (viscosidade diminui com o tempo sob cisalhamento e se recupera em repouso) , reopexia (aumento da viscosidade acelerado por agitação suave) , antitixotropia (viscosidade aumenta com o tempo sob cisalhamento constante), e viscoelasticidade (que combina características elásticas e viscosas). Esses fenômenos, estudados por pioneiros como Theodor Schwedoff, Wilhelm Ostwald, Armand de Waele, Osborne Reynolds, Tibor Péterfi, Herbert Freundlich, Wilhelm Weber, James Clerk Maxwell, Lord Kelvin, Ludwig Boltzmann e Hermann Staudinger são fundamentais para a compreensão e otimização de inúmeras aplicações industriais e fenômenos naturais. O entendimento desses comportamentos complexos, que dependem da microestrutura do fluido, é fundamental para o processamento de alimentos, produtos farmacêuticos, plásticos e fluidos biológicos, entre outros.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento de fluidos é de importância capital tanto para a compreensão de fenômenos naturais quanto para o desenvolvimento de inúmeras aplicações de engenharia. No ponto central deste estudo está o conceito de viscosidade, uma propriedade que descreve as forças de arrasto internas, ou atrito interno, dentro de um fluido quando ele é submetido a tensões de cisalhamento. A viscosidade, em sua essência, quantifica a resistência de um fluido à deformação. As suas aplicações são vastas, abrangendo desde a caracterização do escoamento sanguíneo, fundamental para o entendimento de doenças coronarianas, até a otimização de lubrificantes para sistemas mecânicos complexos.

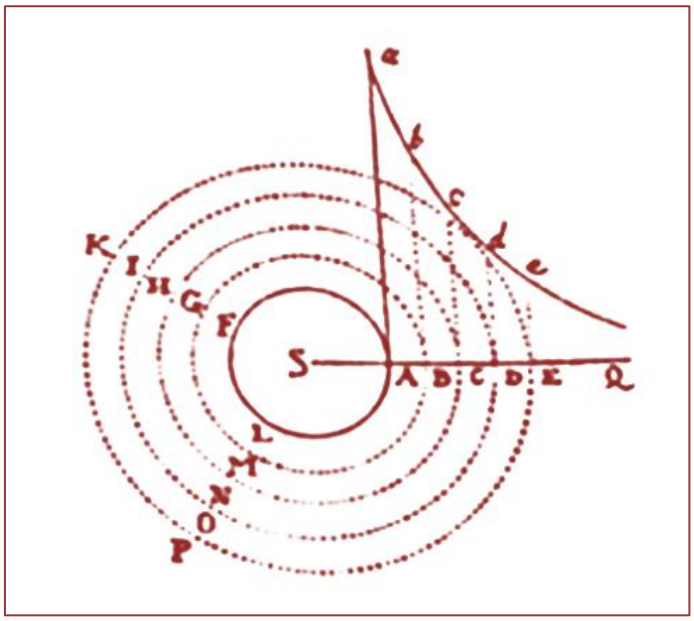
Antes do século XVII, a compreensão da resistência ao escoamento dos fluidos era predominantemente qualitativa. Faltava um arcabouço matemático que pudesse descrever e prever o comportamento dos fluidos sob a ação de forças. Foi nesse contexto que o trabalho pioneiro de Sir Isaac Newton emergiu, fornecendo a primeira descrição quantitativa da viscosidade. Embora a lei de Newton descrevesse com precisão o comportamento de muitos fluidos comuns, como a água e o ar, tornou-se progressivamente claro, especialmente com o avanço da industrialização e a manipulação de substâncias mais complexas, que um grande número de fluidos desviava-se significativamente desse comportamento ideal. Essas observações levaram à necessidade de um campo de estudo mais amplo, dedicado à deformação e ao escoamento da matéria em todas as suas formas: a reologia. A importância prática da viscosidade é tal que a maioria dos problemas de escoamento encontrados em aplicações industriais depende de uma estimativa adequada ou medição precisa desta propriedade. A própria distinção fundamental entre como diferentes tipos de matéria se deformam ou escoam (fluem) sob tensão, que é o cerne da reologia, remonta às primeiras tentativas de classificar o comportamento material, em que a viscosidade surge como uma propriedade chave que diferencia o comportamento de escoamento.

2. O TRABALHO PIONEIRO DE ISAAC NEWTON SOBRE A VISCOSIDADE

A contribuição fundamental de Sir Isaac Newton para a compreensão quantitativa da viscosidade foi apresentada em sua obra monumental, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada em 1687. No Livro II, Seção IX, intitulada O movimento circular dos fluidos, Newton postulou a hipótese que viria a ser conhecida como a Lei da Viscosidade de Newton (ver Figura 1). Ele propôs que: A resistência que surge da falta de lubricidade nas partes de um fluido é, sendo outras coisas iguais, proporcional à velocidade com que as partes do fluido são separadas umas das outras.

Essa falta de lubricidade (*want of lubricity*), ou falta de escorregamento (*lack of slipperiness*) em traduções posteriores, é o conceito precursor da viscosidade como a entendemos modernamente.

Figura 1. Representação gráfica para a postulação de Newton para o movimento de um fluido (NEWTON (2012).



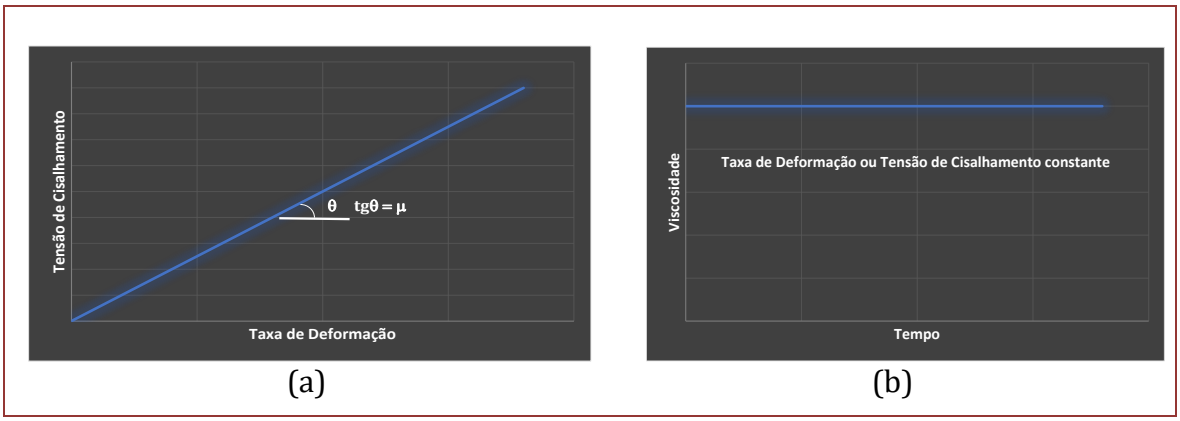
Na formulação de Newton, a resistência corresponde à tensão de cisalhamento (τ), e a velocidade com que as partes do fluido são separadas refere-se ao gradiente de velocidade (a taxa de deformação por cisalhamento[1], du/dy). Assim, a lei de Newton pode ser expressa matematicamente como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad (1)$$

em que é a constante de proporcionalidade, denominada viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido, a qual não depende das condições de cisalhamento impostas nem do tempo de aplicação do cisalhamento nem da história prévia de deformação que tenha sofrido. Graficamente, estas relações podem ser vistas na Figura 2. Esta expressão é, na verdade, um caso especial de uma formulação tensorial mais geral, $\tau = 2\mu\epsilon$, em que τ é o tensor de tensão viscosa e ϵ é o tensor de taxa de deformação.

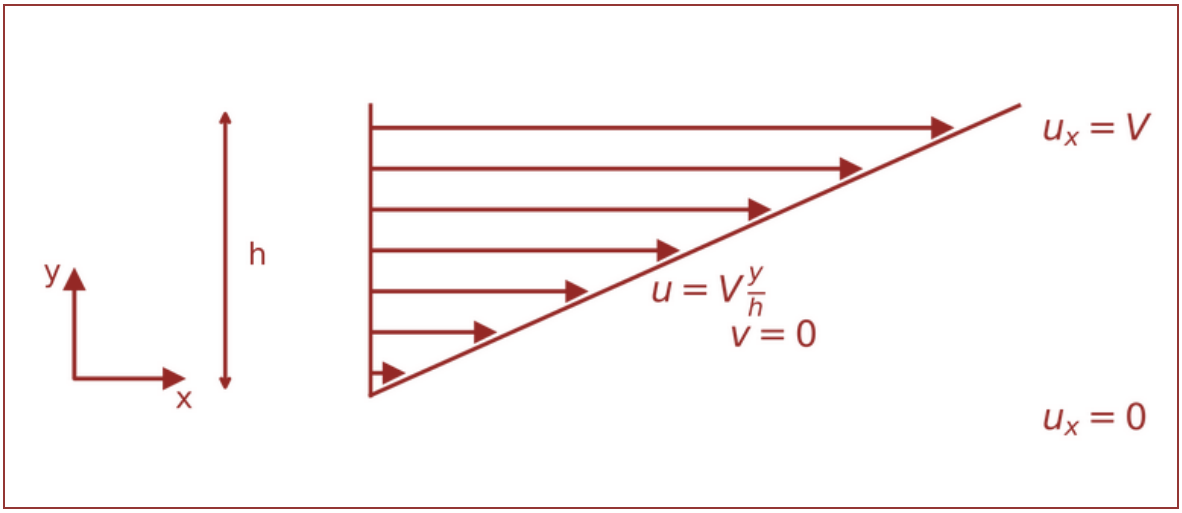
[1] Deste ponto em diante o termo taxa de deformação por cisalhamento será, para fins de simplificação, nomeada de taxa de deformação.

Figura 2. a) curva da tensão de cisalhamento x taxa de deformação (curva de fluxo) e b) curva da viscosidade em função do tempo de aplicação de uma tensão de cisalhamento ou taxa de deformação constante de um fluido newtoniano.



Um fluido que obedece a esta lei é denominado fluido newtoniano. Sua característica principal é que, a uma dada temperatura e pressão, sua viscosidade □ é uma constante material, e é independente da taxa de deformação aplicada. Exemplos clássicos de fluidos newtonianos incluem água, ar, óleos minerais simples e solventes orgânicos. O conceito de Newton pode ser ilustrado pelo experimento de cisalhamento simples, em que um fluido é confinado entre duas placas paralelas. Se uma força é aplicada a uma das placas, fazendo-a mover-se com uma velocidade constante em relação à outra, estabelece-se um perfil de velocidade no fluido. Para um fluido newtoniano, a tensão de cisalhamento necessária para manter este movimento é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade resultante (ver Figura 3).

Figura 3. Perfil de velocidade para um fluido newtoniano entre placas paralelas, uma das quais se movendo a uma velocidade, $u_x(h) = V$.



O impacto das ideias de Newton foi profundo. Ele forneceu a primeira estrutura matemática para entender e quantificar a resistência interna ao escoamento dos fluidos, um passo essencial para o desenvolvimento subsequente da mecânica dos fluidos clássica. A genialidade de Newton residiu na identificação de uma relação linear simples para um fenômeno intrinsecamente complexo, o que abriu as portas para o tratamento matemático do escoamento viscoso. No entanto, essa simplificação elegante inerentemente definiu um comportamento ideal – o newtoniano. Consequentemente, por um longo período, os desvios desta idealização foram categorizados como anômalos ou não newtonianos. A clareza e a força da lei de Newton podem, paradoxalmente, ter contribuído para que os comportamentos não lineares fossem percebidos como mais complicados ou como exceções à regra por um tempo considerável.

É importante notar que o conceito de Newton de falta de lubricidade ou atrito interno era uma descrição fenomenológica baseada na observação macroscópica do comportamento contínuo do fluido. Newton não investigou as origens moleculares da viscosidade; essa exploração só ocorreria muito mais tarde, com o advento da teoria cinética dos gases e da mecânica estatística. Apesar disso, a introdução da viscosidade como uma propriedade material constante (para dadas temperatura e pressão) foi um basilar para o desenvolvimento posterior das equações de Navier-Stokes. Essas equações, que incorporam o termo de atrito viscoso proposto por Newton, formam a base da dinâmica dos fluidos moderna, permitindo a análise de uma vasta gama de problemas de escoamento. Sem a definição precisa de uma viscosidade constante, □, feita por Newton, a formulação dessas equações governantes teria sido imensamente mais desafiadora, senão impossível, na época.

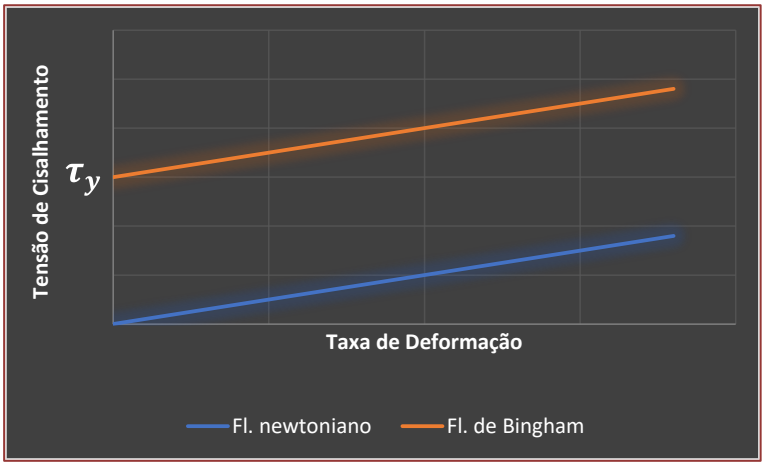
3. PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES DE DESVIOS DO COMPORTAMENTO NEWTONIANO E O NASCIMENTO DA REOLOGIA

Apesar da elegância e da ampla aplicabilidade da lei de Newton para a viscosidade, ao longo do século XIX, acumularam-se observações de que nem todos os fluidos se comportavam de maneira tão simples. Cientistas começaram a notar que a viscosidade de certos fluidos, como suspensões concentradas, soluções de substâncias gomosas e outros líquidos altamente viscosos, não permanecia constante, mas variava significativamente quando uma força era aplicada ou quando a taxa de deformação mudava, mesmo mantendo a temperatura e a pressão constantes. Esses fluidos foram, portanto, classificados como não newtonianos. Um fluido não newtoniano é formalmente definido como aquele cuja curva de escoamento ou de fluxo (relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação) não é linear, ou seja, sua viscosidade aparente depende das condições de escoamento, como a geometria do escoamento, a taxa de deformação e, em alguns casos, até mesmo da história cinemática prévia do elemento fluido. Alguns exemplos de curvas de fluxo de fluidos não newtonianos estão mostrados na Figura 4.

O reconhecimento crescente desses comportamentos complexos e a necessidade de um estudo sistemático da deformação e do escoamento da matéria levaram à formalização de um novo campo científico. O termo reologia, derivado do aforismo grego de Heráclito, panta rhei (πάντα ῥεῖ), que significa tudo flui, foi cunhado em 1916 por Eugene C. Bingham, professor do Lafayette College, nos Estados Unidos, a partir de uma sugestão de seu colega israelense Markus Reiner. Markus Reiner (1886-1976), ele próprio, uma figura central no desenvolvimento da reologia, conhecido por suas contribuições teóricas e experimentais, incluindo a introdução do Número de Deborah.

Esse número adimensional relaciona o tempo característico de relaxação de um material ao tempo de observação do processo de deformação, encapsulando a ideia de que as montanhas fluem diante do Senhor – ou seja, tudo flui, se o tempo de observação for suficientemente longo em comparação com a capacidade do material de relaxar tensões.

Figura 4. Curva de fluxo do fluido de Bingham frente à curva de um fluido newtoniano



A reologia, portanto, emergiu como a ciência que estende os princípios da mecânica do contínuo para caracterizar o escoamento de materiais que exibem uma combinação de comportamentos elástico (armazenamento de energia de deformação), viscoso (dissipação de energia como calor) e plástico (deformação permanente acima de uma certa tensão). De forma geral, os fluidos não newtonianos podem ser classificados, com base na natureza de sua resposta à tensão de cisalhamento, em três grandes categorias: fluidos cuja viscosidade depende apenas da taxa de deformação (independentes do tempo), fluidos cuja viscosidade depende da duração do cisalhamento e da história de cisalhamento (dependentes do tempo), e fluidos que exibem características tanto de sólidos elásticos quanto de fluidos viscosos (viscoelásticos). Uma distinção breve entre essas 3 situações pode ser vista nas Figuras 5 a 7. Na categoria dos fluidos não newtonianos independentes do tempo, incluem-se os que apresentam um comportamento de um sólido plástico antes de permitir um escoamento viscoso. Esses são chamados de viscoplásticos, e o mais conhecido deles recebe o nome de fluido de Bingham em homenagem ao pai da reologia. Os comportamentos viscoplásticos podem ser vistos na Figura 7.

Figura 5. Apresentação dos comportamentos newtonianos e alguns não newtonianos dependentes e independentes do tempo.

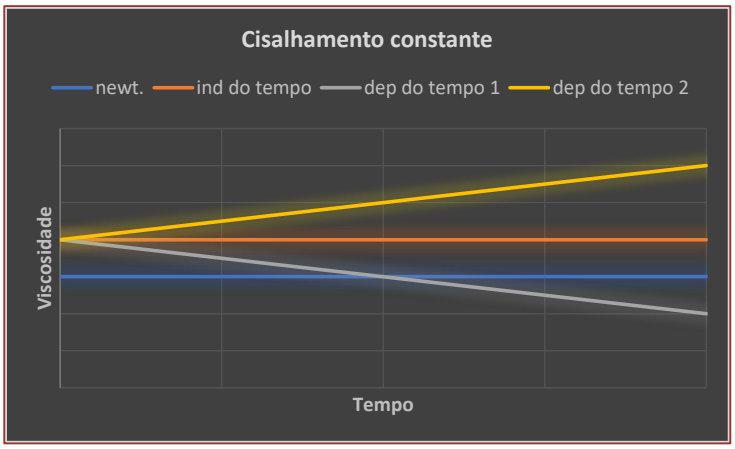


Figura 6. Comportamento da deformação de acordo com a variação da tensão com o tempo para fluidos newtoniano e viscoelástico (Fluido de Maxwell, visto mais à frente).

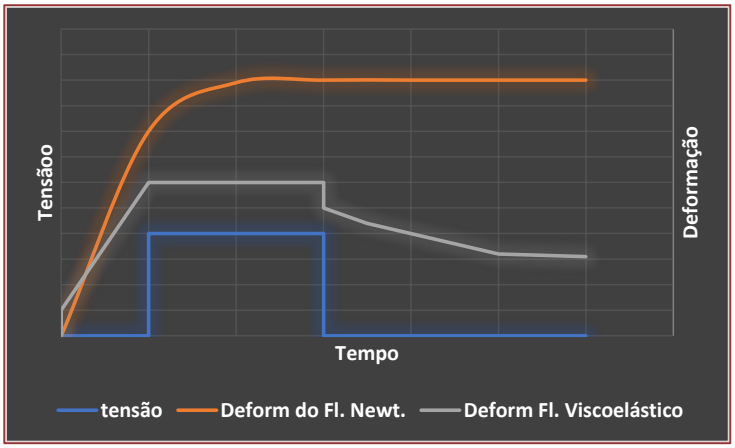
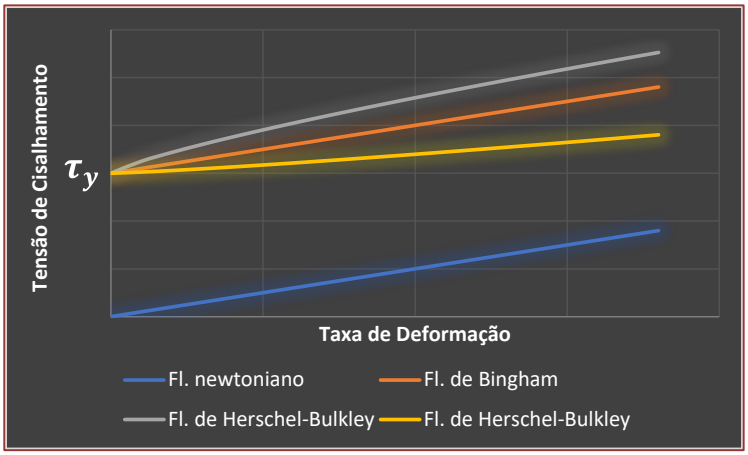


Figura 7. Curvas de fluxo de fluidos viscoplásticos em comparação com a de um fluido newtoniano.



A necessidade de caracterizar fluidos não newtonianos foi impulsionada de forma significativa pelo avanço de diversas indústrias que lidavam rotineiramente com materiais como suspensões concentradas (por exemplo: tintas, cerâmicas, cimento), emulsões (por exemplo: maionese, laticínios), soluções poliméricas, e muitos outros fluidos estruturados (por exemplo: lamas de perfuração, fluidos biológicos como sangue, alimentos processados). Nestes sistemas, o comportamento newtoniano é frequentemente a exceção, e não a regra. O desenvolvimento de processos industriais no final do século XIX e início do século XX, que envolviam o bombeamento, a mistura, a moldagem e o revestimento com esses materiais complexos, exigia uma compreensão muito mais aprofundada de suas propriedades de escoamento do que a simples lei de Newton poderia oferecer.

Com isso, a própria definição de viscosidade tornou-se mais matizada. Para os fluidos newtonianos, a viscosidade é uma constante material intrínseca (para dadas temperatura e pressão). Para os fluidos não newtonianos, no entanto, introduziu-se o conceito de viscosidade aparente, que não é uma propriedade constante do material, mas sim uma função da taxa de deformação aplicada ou da história do escoamento. Esta viscosidade aparente pode aumentar ou diminuir com a taxa de deformação ou com o tempo de cisalhamento. Essa mudança conceitual complicou significativamente tanto a medição experimental da viscosidade, exigindo o desenvolvimento de viscosímetros e reômetros capazes de operar sob diferentes taxas de deformação controladas, quanto a modelagem matemática do comportamento de escoamento, levando à formulação de uma variedade de equações constitutivas não lineares. A tabela abaixo resume os principais fenômenos e os pioneiros associados que serão discutidos nas seções subsequentes.

Na Tabela 1, pode ser visto um resumo dos principais e iniciais comportamentos não newtonianos, seus descobridores, os trabalhos iniciais e as características principais dos materiais que obedecem a esses novos modelos, assim como o newtoniano, também idealizados, ou seja, são modelos que tentam ajustar o comportamento de materiais reais que não seguem estritamente o modelo de Newton sob determinadas circunstâncias.

Tabela 1: Resumo dos Fenômenos newtonianos e Não newtonianos Chave e Seus Pioneiros

Fenômeno	Característica Base	Pioneiro(s) Chave	Contribuição Seminal / Ano	Exemplo de Material Típico
Viscosidade Newtoniana	Viscosidade constante, independente da taxa de deformação.	Isaac Newton	*Principia Mathematica*, Lei da Viscosidade, 1687	Água, ar, óleos minerais puros
Viscoplasticidade	Requer uma tensão de escoamento (yield stress) mínima para iniciar o escoamento.	Theodor Schwedoff, Eugene C. Bingham, Herschel & Bulkley	Observações em gelatina (c. 1890), Modelo de Bingham (c. 1916-1922), Modelo de Herschel-Bulkley (1926)	Pasta de dente, tintas, graxas
Pseudoplasticidade (Shear-thinning)	Viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação.	Wilhelm Ostwald, Armand de Waele	Modelo de Lei de Potência (Ostwald-de Waele), c. 1923-1925	Tintas látex, soluções poliméricas, ketchup
Dilatância (Shear-thickening)	Viscosidade aumenta com o aumento da taxa de deformação.	Osborne Reynolds, Freundlich & Roder	Conceito de dilatância em granulares (1885), Observações em suspensões (c. 1930s), Modelo de Lei de Potência (n>1)	Suspensões de amido de milho, areia molhada

Tabela 1: Resumo dos Fenômenos newtonianos e Não newtonianos Chave e Seus Pioneiros (continuação)

Fenômeno	Característica Base	Pioneiro(s) Chave	Contribuição Seminal / Ano	Exemplo de Material Típico
Tixotropia	Viscosidade diminui com o tempo sob cisalhamento constante; recupera-se no repouso.	Tibor Péterfi, Herbert Freundlich	Definição e estudos em géis coloidais (c. 1923-1927)	Géis de argila, iogurte, algumas tintas
Reopexia	Solidificação ou aumento de viscosidade acelerado por agitação suave e contínua.	Herbert Freundlich, F. Juliusburger	Definição e observações (c. 1935)	Pastas de gesso, alguns lubrificantes
Antitixotropia (Tixotropia Negativa)	Viscosidade aumenta com o tempo sob cisalhamento constante.	S. Peter, A.S.C. Lawrence	Modelos constitutivos (data incerta para Peter, S. generalizado em 1965), Observações em magma de magnésia (1960)	Magma de magnésia, algumas suspensões de argila
Viscoelasticidade	Exibe comportamento tanto elástico (armazenamento de energia) quanto viscoso (dissipação de energia).	Weber, Maxwell, Kelvin, Boltzmann, Voigt, Staudinger	Observações em seda (1835), Modelo de Maxwell (1867), Modelo Kelvin-Voigt (1865-1890), Princípio da Superposição (1874), Estudos em polímeros (a partir de 1920)	Soluções poliméricas, borrachas, géis

4. VISCOPLASTICIDADE: A DESCOBERTA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO OU TENSÃO RESIDUAL (YIELD STRESS)

Um dos primeiros e mais significativos desvios do comportamento newtoniano a ser sistematicamente estudado foi a viscoplasticidade, caracterizada pela existência de uma tensão de escoamento ou tensão residual para diferir do termo referente ao início da deformação plástica de um sólido (*yield stress* em inglês). Fluidos viscoplásticos comportam-se como sólidos rígidos ou elásticos quando submetidos a tensões de cisalhamento abaixo de um valor crítico, a tensão de escoamento ou residual (τ_y). Somente quando a tensão aplicada excede τ_y é que o material começa a fluir como um líquido, embora frequentemente de forma não newtoniana.

Observações qualitativas de materiais que exibiam um limiar para o escoamento, como pastas de argila, gesso e certas lamas, já existiam há algum tempo. No entanto, as primeiras investigações quantitativas e a conceituação da tensão de escoamento como uma propriedade reológica distinta surgiram no final do século XIX e início do século XX. Theodor Schwedoff, em 1890, ao realizar experimentos com soluções coloidais de gelatina utilizando um viscosímetro de cilindros coaxiais (dispositivo de Couette), notou uma não linearidade pronunciada na relação entre o torque aplicado e a velocidade angular resultante. Para descrever adequadamente seus resultados experimentais, Schwedoff teve que incorporar um valor de escoamento (*yield value*), o que representa uma das primeiras tentativas de quantificar este fenômeno em sistemas não newtonianos. Alguns anos depois, em 1904, F. T. Trouton e E. S. Andrews, ao estudarem o escoamento de piche, também identificaram a necessidade de subtrair uma pequena tensão inicial dos seus dados para obter uma proporcionalidade entre a taxa de escoamento e a tensão aplicada, mais uma indicação precoce da existência de uma tensão de limiar. A plasticidade em

materiais moles, de forma geral, começou a ser categorizada por Schwedoff no início do século XX.

Contudo, foi o trabalho de Eugene C. Bingham que solidificou o conceito de tensão de escoamento e introduziu um modelo matemático simples para descrever o comportamento viscoplástico. Bingham propôs a forma matemática para o que hoje conhecemos como plásticos de Bingham por volta de 1916. Sua pesquisa fundamental foi detalhada na publicação An Investigation of the Laws of Plastic Flow, divulgada em 1916 no *Bulletin of the Bureau of Standards* dos EUA. Neste trabalho, Bingham investigou experimentalmente o comportamento de escoamento de tintas e suspensões de argila, materiais que exibiam claramente a característica de não fluir até que uma tensão mínima fosse aplicada. Bingham citou explicitamente os comentários anteriores de James Clerk Maxwell sobre a distinção entre os estados da matéria perfeitamente elástico, macio ou plástico e fluido viscoso, enfatizando a necessidade de considerar as escalas de tempo e força relevantes. Embora algumas fontes citem 1919 como o ano em que Bingham definiu reologicamente os materiais viscoplásticos ao estudar tintas, seu trabalho seminal data de 1916.

O modelo de Bingham (Eq. 2) postula que, para tensões de cisalhamento (□) abaixo da tensão de escoamento τ_y, $\tau = 0$, e que para qualquer $\tau > \tau_y$:

$$\tau = \tau_y + \mu_P \dot{\gamma} \qquad (2)$$

Em que μ_P é a viscosidade plástica, uma constante que representa a resistência ao escoamento uma vez que a tensão de escoamento foi superada. Exemplos clássicos de materiais que se aproximam do comportamento de Bingham incluem pasta de dente, maionese, certas tintas e lamas de perfuração. A existência de uma tensão de escoamento permite que esses materiais mantenham formas, como picos e sulcos em uma superfície, quando em repouso.

O modelo de Bingham, embora útil, era uma simplificação, pois assumia um comportamento de escoamento newtoniano (viscosidade constante μ_p) acima da tensão de escoamento. Muitos materiais viscoplásticos, no entanto, exibem um comportamento de afinamento ou espessamento por cisalhamento uma vez que começam a fluir. Para descrever esses sistemas de forma mais completa, Winslow Herschel e Ronald Bulkley, em 1926, introduziram um modelo mais generalizado, conhecido como modelo de Herschel-Bulkley (Eq. 3). Este modelo combina a tensão de escoamento com uma relação de lei de potência para o escoamento acima do limiar:

$$\tau = \tau_y + K(\dot{\gamma})^n \quad \left(\text{para } |\tau| > |\tau_y|\right) \qquad (3)$$

com $\dot{\gamma} = 0 \quad \left(\text{para } |\tau| \leq |\tau_y|\right)$. Aqui, K é o índice de consistência e n é o índice de afastamento do comportamento newtoniano, para o qual se $n = 1$, o modelo de Herschel-Bulkley reduz- se ao modelo de Bingham. Se $\tau_y = 0$, ele se torna o modelo de lei de potência (discutido posteriormente). Se $n < 1$,o fluido é pseudoplástico acima de τ_y; $n > 1$, o material é dilatante (ver Figura 7). Este modelo provou ser muito versátil para descrever uma ampla gama de fluidos com tensão de escoamento.

Posteriormente, em 1932, Kurt Hohenemser e William Prager propuseram um dos primeiros modelos para o escoamento viscoplástico lento, especificamente para um sólido de Bingham incompressível, contribuindo para o desenvolvimento teórico da viscoplasticidade.

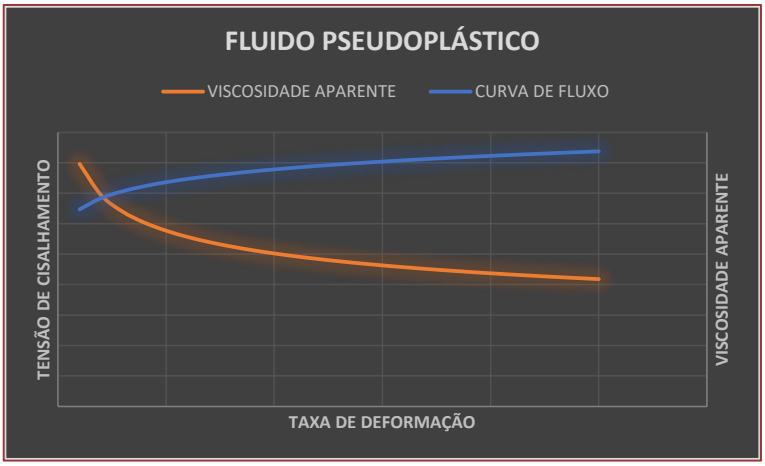
A identificação da viscoplasticidade e do conceito de tensão de escoamento representou um afastamento crucial da noção de fluidez contínua, implícita no comportamento dos fluidos newtonianos. Este novo paradigma introduziu a ideia de que certos materiais podem exibir um comportamento dual, agindo como sólidos abaixo de um limiar de tensão específico e como fluidos somente quando esse limiar é ultrapassado. Essa dualidade sólido-líquido é uma característica definidora da viscoplasticidade e contrasta fortemente com a resposta puramente viscosa dos fluidos newtonianos, que fluem sob qualquer tensão de cisalhamento, por menor que seja. O estudo de materiais comuns como tintas e suspensões de argila foi fundamental para o desenvolvimento inicial do conceito de tensão de escoamento. Esses fluidos estruturados, em que interações entre partículas ou macromoléculas podem formar uma rede interna fraca que precisa ser rompida para o escoamento iniciar, serviram como sistemas modelo ideais para os primeiros pesquisadores.

A introdução de modelos matemáticos como os de Bingham e Herschel-Bulkley não apenas permitiu a descrição fenomenológica desses comportamentos, mas também forneceu ferramentas quantitativas essenciais para engenheiros e cientistas. Esses modelos possibilitaram o projeto e o controle de processos industriais envolvendo materiais viscoplásticos complexos, como a extrusão de pastas, o bombeamento de lamas e a aplicação de revestimentos. Sem esses modelos, a caracterização e o manuseio de fluidos viscoplásticos permaneceriam em grande parte empíricos e qualitativos. É interessante notar que, desde as primeiras discussões, houve um debate persistente sobre a verdadeira existência de uma tensão de escoamento. Alguns argumentam que, com instrumentos suficientemente sensíveis e tempos de observação suficientemente longos, todos os materiais eventualmente fluiriam, ecoando a ideia de panta rhei de Reiner. No entanto, para propósitos práticos e nas escalas de tempo relevantes para a engenharia e muitas aplicações do mundo real, o conceito de tensão de escoamento provou ser imensamente útil e continua sendo um parâmetro fundamental na reologia de muitos materiais.

5. PSEUDOPLASTICIDADE

Outro desvio comum e importante do comportamento newtoniano é a pseudoplasticidade. Fluidos pseudoplásticos são caracterizados por uma diminuição na sua viscosidade aparente à medida que a taxa de deformação aplicada aumenta (Ver Figura 8). Este comportamento é exibido por uma vasta gama de materiais, incluindo muitas soluções poliméricas, suspensões coloidais e emulsões. Um exemplo quotidiano é a tinta látex: ela parece espessa na lata, mas flui mais facilmente quando é pincelada vigorosamente (alta taxa de deformação), permitindo uma aplicação suave, e depois recupera uma viscosidade mais alta para evitar escorrimento excessivo.

Figura 8. Curva de viscosidade aparente versus taxa de deformação para um fluido pseudoplástico e para um fluido newtoniano.



As primeiras observações sistemáticas de que a viscosidade poderia ser uma função da taxa de deformação foram feitas no início do século XX. W. R. Hess (1910) e Emil Hatschek (1913), por exemplo, postularam tal dependência com base em seus estudos com sóis de gelatina, que podem exibir um comportamento de afinamento por cisalhamento, de forma análoga aos resultados anteriores de Schwedoff com os mesmos sistemas.

A quantificação deste comportamento deu um passo significativo com a introdução do modelo de Ostwald-de Waele (Eq. 4), comumente referido como a lei de potência. Este modelo foi proposto independentemente pelo químico alemão Friedrich Wilhelm Ostwald por volta de 1925 e pelo químico britânico Armand de Waele por volta de 1923. A equação da lei de potência relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de deformação (γ̇ ou du/dy) da seguinte forma:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \qquad (4)$$

em que K e n já definidos anteriormente. Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento de escoamento $n < 1$. Quando $n = 1$, a equação se reduz à lei de Newton (com $K = \mu$), descrevendo um fluido newtoniano. Quando $n > 1$, o fluido é classificado como dilatante (espessamento por cisalhamento), como será discutido na próxima seção. A viscosidade aparente (η_{ap}), ou simplesmente (η). Para um fluido da lei de potência ou fluido da potência, pode ser definida como $\eta = \tau/\dot{\gamma} = K\dot{\gamma}^{n-1}$. Para um fluido pseudoplástico ($n < 1$), como $n - 1$ é negativo, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação o contrário ocorre com a dilatância, pois, neste caso, $n - 1$ será positvo.

Armand de Waele publicou seus trabalhos sobre o tema, incluindo o artigo Viscometry and Plastometry no *Journal of the Oil & Colour Chemists Association* em 1923, em que provavelmente introduziu suas ideias sobre a relação de potência. Wilhelm Ostwald, um renomado químico físico conhecido por seus trabalhos em catálise e equilíbrios químicos, também contribuiu significativamente para a compreensão da viscosidade de sistemas dispersos, como detalhado em seu artigo de 1925 Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme publicado no *Kolloid-*

Zeitschrift. Há indicações de que o próprio Ostwald, em uma publicação de 1929, referiu-se à equação como a lei de de Waele-Ostwald, sugerindo um reconhecimento mútuo ou uma evolução conceitual paralela.

O mecanismo físico subjacente ao comportamento de afinamento por cisalhamento em muitos sistemas, como soluções poliméricas e suspensões de partículas anisométricas, é frequentemente atribuído à orientação progressiva das macromoléculas ou partículas na direção do escoamento à medida que a taxa de deformação aumenta. Em repouso ou sob baixo cisalhamento, essas entidades podem estar orientadas aleatoriamente ou formar estruturas agregadas fracas, resultando em maior resistência ao escoamento (maior viscosidade). Com o aumento da taxa de deformação, essas estruturas podem ser quebradas ou os componentes individuais podem se alinhar com as linhas de corrente, reduzindo o arrasto hidrodinâmico e, consequentemente, a viscosidade aparente.

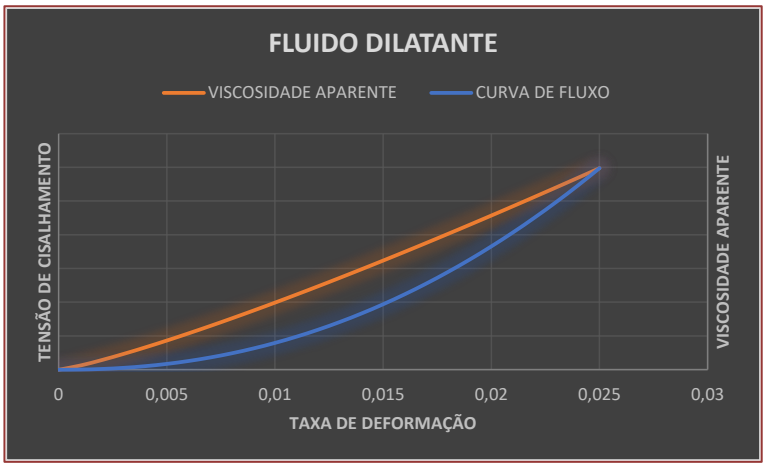
A introdução do modelo de lei de potência foi um marco, pois forneceu uma maneira simples, porém eficaz, de quantificar o comportamento de uma vasta classe de fluidos não newtonianos cuja viscosidade não era constante, mas variava de forma previsível e contínua com a taxa de deformação. Embora seja uma aproximação e possa não descrever o comportamento do fluido em taxas de deformação muito baixas ou muito altas (em que alguns fluidos pseudoplásticos podem exibir platôs newtonianos), sua simplicidade matemática tornou-o uma ferramenta valiosa para engenheiros e cientistas na caracterização, previsão e correlação de dados experimentais para muitos fluidos industriais e naturais. A atribuição precisa da primeira proposta da lei de potência para pseudoplasticidade pode ter suas nuances históricas, refletindo um período de intensa investigação na florescente ciência dos coloides e sistemas dispersos, em que tanto Ostwald quanto de Waele fizeram contribuições significativas.

Mais profundamente, o fenômeno da pseudoplasticidade e sua modelagem começaram a conectar o comportamento reológico macroscópico observado com a microestrutura do fluido – a orientação de partículas e polímeros, e a quebra e reforma de agregados. Isso marcou um avanço em direção a uma compreensão da reologia não apenas como uma descrição fenomenológica, mas como uma manifestação direta de interações e arranjos em nano e microescala, um tema que se tornaria central na reologia moderna.

6. DILATÂNCIA

Em contraste direto com a pseudoplasticidade, a dilatância é um comportamento não newtoniano em que a viscosidade aparente de um fluido aumenta com o aumento da taxa de deformação (ver Figura 9). Este fenômeno, embora menos comum que o afinamento por cisalhamento, é observado em certas suspensões concentradas e pode ser bastante dramático.

Figura 9. Curva de viscosidade aparente versus taxa de deformação para um fluido dilatante e para um fluido newtoniano.



O termo dilatância (*dilatancy* em inglês) foi originalmente introduzido por Osborne Reynolds em 1885. Reynolds usou o termo para descrever a propriedade exibida por um material granular (como areia) de alterar seu volume em resposta a uma mudança no arranjo de seus grãos sob a aplicação de tensão. Ele demonstrou isso classicamente com o exemplo de esferas empacotadas: um empacotamento denso de esferas, quando cisalhado, pode expandir seu volume (dilatar) à medida que as esferas precisam se mover umas sobre as outras. Um exemplo prático que ele usou foi o fenômeno observado quando se pisa em areia úmida e firme na praia: a área ao redor do pé parece secar momentaneamente, pois a pressão faz com que os grãos de areia se rearranjem em uma configuração menos compacta, aumentando o volume dos poros e puxando a água superficial para dentro desses espaços.

Embora o trabalho original de Reynolds estivesse focado na mudança de volume em sistemas granulares, o termo dilatante foi subsequentemente adotado na reologia para descrever fluidos que exibem um aumento na viscosidade com a taxa de deformação, mesmo que uma mudança de volume significativa não seja o mecanismo primário ou o único em jogo. O modelo de Ostwald-de Waele (lei de potência), como visto anteriormente, impõe que $n > 1$.

As primeiras observações e caracterizações sistemáticas de espessamento por cisalhamento em sistemas fluidos surgiram mais claramente nas décadas de 1930. Herbert Freundlich e H. L. Roder, em 1938, em um trabalho que discutia a relação entre tixotropia e dilatância, descreveram a dilatância como um aumento na resistência ao escoamento com o aumento da taxa de deformação, em oposição ao comportamento tixotrópico. Eles observaram experimentalmente o comportamento dilatante em suspensões aquosas de partículas de quartzo finas (1-5 µm) dentro de uma faixa específica de concentração de sólidos (42-45% por volume). Outros pesquisadores, como R. V. Williamson e W. W. Hecker, já no início dos anos 1930, também forneceram descrições do que hoje é conhecido como espessamento por cisalhamento descontínuo (DST), um tipo extremo de dilatância em que a viscosidade pode aumentar abrupta e significativamente por várias ordens de magnitude acima de uma taxa de deformação crítica.

Exemplos comuns de fluidos dilatantes incluem suspensões altamente concentradas de amido de milho em água (conhecidas popularmente como oobleck) e areia molhada compactada. O oobleck, em particular, é um exemplo notável de DST: pode ser derramado como um líquido espesso, mas torna-se quase sólido e resiste à penetração quando submetido a um impacto súbito ou cisalhamento rápido.

O mecanismo físico subjacente à dilatância em suspensões concentradas é complexo e ainda é uma área de pesquisa ativa. No entanto, uma explicação comum envolve a transição de um estado de escoamento ordenado ou lubrificado em baixas taxas de deformação para um estado desordenado e com maior contato entre partículas em altas taxas de deformação. Em suspensões densas, as partículas podem formar camadas que deslizam umas sobre as outras sob baixo cisalhamento. À medida que a taxa de deformação aumenta, essa estrutura ordenada pode ser rompida, levando à formação de aglomerados de partículas transientes e interconectados, conhecidos como hidroclusters ou jamming clusters. Esses clusters obstruem o escoamento, resultando em um aumento acentuado da viscosidade. A teoria da transição ordem-desordem, proposta por R. L. Hoffman, também é frequentemente invocada para explicar o fenômeno, em que o espessamento por cisalhamento coincide com uma transição de um arranjo de partículas ordenado para um menos ordenado.

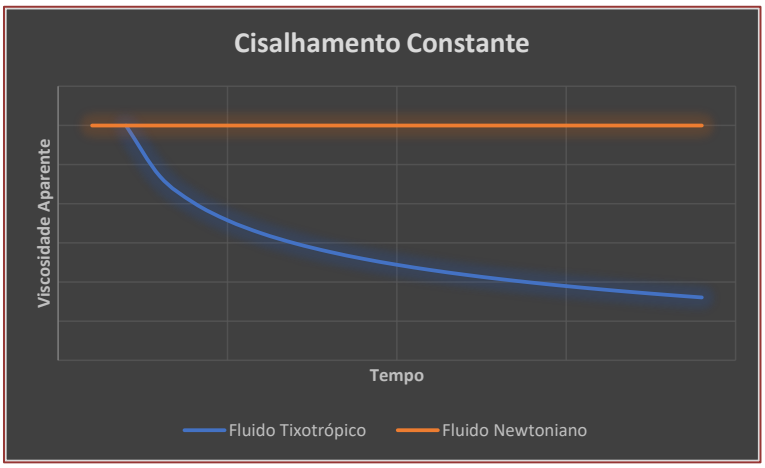
A conexão inicial do termo dilatância por Reynolds com a mudança de volume em sistemas granulares e sua aplicação subsequente a fluidos que espessam por cisalhamento ilustra uma evolução comum na terminologia científica, em que os conceitos são adaptados e ampliados à medida que novos fenômenos e mecanismos são compreendidos. Embora a mudança de volume possa desempenhar um papel em alguns sistemas dilatantes, o termo tornou-se amplamente sinônimo de espessamento por cisalhamento em fluidos, independentemente do mecanismo exato de mudança de volume. O fenômeno da dilatância, especialmente em sua forma descontínua (DST), representa um dos comportamentos reológicos mais contraintuitivos e desafiadores de modelar. Ele frequentemente envolve transições abruptas de um estado fluido para um estado quase sólido, como evidenciado pela capacidade de correr sobre uma piscina de oobleck. Essa natureza dramática e altamente não linear torna a modelagem teórica e a previsão experimental particularmente difíceis, exigindo avanços tanto na instrumentação reológica (para medir viscosidades sob altas taxas de deformação e observar estruturas transientes) quanto nos modelos teóricos que podem capturar as complexas interações partícula-fluido e partícula-partícula que levam à formação de estruturas induzidas pelo escoamento.

7. TIXOTROPIA: DEPENDÊNCIA TEMPORAL DA VISCOSIDADE COM RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL

A tixotropia é um comportamento reológico dependente do tempo, caracterizado por uma diminuição gradual da viscosidade aparente de um fluido quando ele é submetido a uma tensão de cisalhamento ou taxa de deformação constante ao longo do tempo (ver Figura 10). Crucialmente, essa redução na viscosidade é reversível: se o cisalhamento for interrompido e o fluido for deixado em repouso, sua viscosidade original (ou uma viscosidade mais alta) é gradualmente recuperada ao longo do tempo. Este comportamento é fundamentalmente diferente da pseudoplasticidade (afinamento por cisalhamento), que descreve uma diminuição da viscosidade com o *aumento da taxa de deformação* e é geralmente considerada uma resposta instantânea, independente do

tempo de cisalhamento. A tixotropia implica uma mudança na microestrutura interna do fluido, que é quebrada pelo cisalhamento e se reconstrói durante o repouso.

Figura 10. Curva de viscosidade aparente versus tempo sob cisalhamento constante para um fluido tixotrópico e para um fluido newtoniano.



O termo tixotropia foi cunhado em 1927 por Tibor Péterfi, um biólogo húngaro, em consulta com o renomado químico físico alemão Herbert Freundlich. A palavra deriva do grego *thixis* (θίξις), que significa toque ou agitação, e *trepo* (τρέπω), que significa virar ou mudar. Originalmente, o termo foi usado para descrever a transformação isotérmica e reversível de um sol (um estado fluido coloidal) para um gel (um estado semissólido) induzida por agitação mecânica e a subsequente reversão para o estado de sol no repouso, ou vice-versa, dependendo da definição inicial do sistema.

Herbert Freundlich e seus colaboradores, incluindo E. Schalek e A. Szegvari, foram pioneiros na investigação sistemática da tixotropia. Já em 1923, Schalek e Szegvari, trabalhando no laboratório de Freundlich, relataram o comportamento tixotrópico em dispersões aquosas concentradas de óxido de ferro (Fe_2O_3). Eles observaram que esses géis podiam ser liquefeitos por agitação e depois se solidificavam novamente quando deixados em repouso. Freundlich e seus coautores publicaram vários artigos importantes sobre o tema, como Über die Thixotropie des konzentrierten Eisenoxydsols com W. Rawitzer em 1927 e trabalhos com K. Söllner em 1928. A definição mais comumente aceita de tixotropia, atribuída a Freundlich e posteriormente adotada pela IUPAC, descreve-a como a diminuição contínua da viscosidade com o tempo quando o escoamento é aplicado a uma amostra que estava previamente em repouso, e a subsequente recuperação da viscosidade ao longo do tempo quando o escoamento é descontinuado. Mitchell (1961) também enfatizou que a tixotropia é um processo isotérmico, reversível e dependente do tempo, que ocorre com composição e volume constantes do material.

Além dos géis de óxido de ferro, outros materiais foram rapidamente identificados como exibindo comportamento tixotrópico. Suspensões de argila bentonítica são exemplos clássicos. A bentonita, quando dispersa em água, pode formar uma estrutura de castelo de cartas tridimensional que confere ao sistema uma alta viscosidade ou mesmo um caráter de gel em repouso. Sob cisalhamento, essa estrutura é progressivamente

quebrada, levando a uma diminuição da viscosidade. Com a cessação do cisalhamento, as interações entre as partículas de argila permitem que a rede se reconstrua lentamente. Outros exemplos comuns de materiais tixotrópicos incluem lamas de perfuração, muitas tintas, ketchup, iogurte, e até mesmo fluidos biológicos como o citoplasma e o líquido sinovial.

Experimentalmente, uma das maneiras de identificar e caracterizar a tixotropia é através da observação de curvas de histerese em experimentos de varredura de taxa de deformação. Nesses testes, a taxa de deformação é primeiro aumentada de um valor baixo para um valor alto (curva ascendente) e depois diminuída de volta para o valor baixo (curva descendente). Para um fluido tixotrópico, a curva descendente de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação geralmente fica abaixo da curva ascendente, formando um laço de histerese. A área dentro deste laço é frequentemente considerada uma medida qualitativa da tixotropia, embora sua interpretação quantitativa seja complexa e dependente das condições experimentais.

A introdução do conceito de tixotropia foi um marco porque trouxe explicitamente a história do cisalhamento e o tempo como variáveis cruciais na determinação do estado reológico de um fluido. Isso representou um aumento significativo na complexidade em relação aos fluidos newtonianos (cuja viscosidade depende apenas da temperatura e pressão) e aos fluidos não newtonianos puramente dependentes da taxa de deformação (como os pseudoplásticos e dilatantes, cuja resposta é idealmente instantânea). A viscosidade de um fluido tixotrópico não é apenas uma função da taxa de deformação atual, mas também de quanto tempo ele foi cisalhado e de seu estado estrutural no início do cisalhamento.

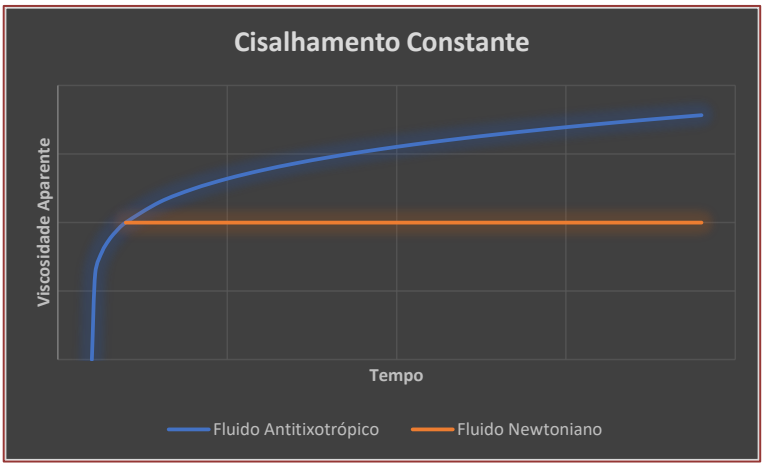
A compreensão da tixotropia está, portanto, intrinsecamente ligada à ideia de uma microestrutura interna reversível. O cisalhamento fornece a energia para quebrar as ligações ou desorganizar a estrutura que confere alta viscosidade ao material em repouso. A subsequente reconstrução dessa estrutura durante o período de repouso é um processo cinético que depende das interações interpartículas ou intermoleculares e do movimento Browniano. Este entendimento impulsionou inúmeras investigações sobre a natureza dessas microestruturas em diversos sistemas coloidais e poliméricos.

É importante notar que a distinção entre tixotropia (dependente do tempo) e pseudoplasticidade (dependente da taxa de deformação, mas idealmente independente do tempo) nem sempre foi trivial, especialmente nas primeiras investigações, e continua a ser uma área que exige protocolos experimentais cuidadosos para uma diferenciação inequívoca. Muitos fluidos que são tixotrópicos também exibem comportamento pseudoplástico; ou seja, sua viscosidade de equilíbrio em uma dada taxa de deformação (após tempo suficiente de cisalhamento para atingir o estado estacionário) é menor em taxas de deformação mais altas. A característica distintiva da tixotropia é a evolução temporal da viscosidade em direção a esse valor de equilíbrio e sua recuperação temporal no repouso.

8 ANTITIXOTROPIA (TIXOTROPIA NEGATIVA): AUMENTO DA VISCOSIDADE DEPENDENTE DO TEMPO

A antitixotropia, também conhecida como tixotropia negativa, é um comportamento reológico em que a viscosidade aparente de um fluido aumenta progressivamente ao longo do tempo quando submetido a uma tensão de cisalhamento ou taxa de deformação constante (ver Figura 11). Este fenômeno é, como o nome sugere, o oposto da tixotropia, em que a viscosidade diminui com o tempo de cisalhamento. Assim como a tixotropia, a antitixotropia é um processo reversível; idealmente, a viscosidade retornaria ao seu valor inicial mais baixo se o fluido fosse deixado em repouso por tempo suficiente, embora a completa reversibilidade possa ser difícil de alcançar em alguns sistemas. A IUPAC, ao estender sua definição de tixotropia, descreve a antitixotropia como um fenômeno em que o escoamento causa um aumento reversível na viscosidade.

Figura 11. Curva de viscosidade aparente versus tempo sob cisalhamento constante para um fluido antitixotrópico e para um fluido newtoniano.



A identificação e caracterização da antitixotropia como um comportamento reológico distinto ocorreram após o estabelecimento dos conceitos de tixotropia e reopexia. Embora os fragmentos de pesquisa não forneçam uma data exata para a primeira observação ou o uso do termo antitixotropia, eles apontam para contribuições significativas em meados do século XX. menciona que equações constitutivas para fluidos antitixotrópicos foram propostas por S. Peter, e que essas, juntamente com as de Moore para fluidos tixotrópicos, foram posteriormente generalizadas por D. C.-H. Cheng e F. Evans em um artigo de 1965 no *British Journal of Applied Physics*. Este trabalho de Cheng e Evans introduziu um parâmetro de estrutura (\lambda) para descrever a evolução temporal tanto da tixotropia quanto da antitixotropia. A contribuição original de S. Peter não é detalhada com data específica nos materiais fornecidos.

Um dos primeiros exemplos bem documentados de comportamento antitixotrópico foi relatado por A.S.C. Lawrence em 1960. Em seu estudo sobre magma de magnésia U.S.P. (uma suspensão aquosa de hidróxido de magnésio), Lawrence observou um comportamento reológico incomum que envolve uma transformação sol-gel durante a medição em um viscosímetro rotacional, e um retorno espontâneo a um estado sol em repouso. Ele descreveu explicitamente esse fenômeno como o reverso da tixotropia e sugeriu que o termo antitixotropia o descreveria melhor. Suas observações, feitas com um reômetro de Drage e confirmadas com um viscosímetro Stormer modificado, indicaram que o aumento na consistência durante o cisalhamento (em taxas de deformação de aproximadamente 30 \text{ s}^{-1} e maiores) era devido principalmente a um aumento no valor de escoamento aparente, sem alteração significativa nas inclinações das curvas de escoamento.

Outros materiais que podem exibir antitixotropia incluem algumas suspensões de argila sob condições específicas de concentração, tipo de argila e química da água, e certas soluções poliméricas, como poliacrilamida ou poli(metil metacrilato), especialmente em taxas de deformação muito baixas e por longos períodos. Emulsões altamente concentradas (HIPEs) também podem mostrar antitixotropia dependendo da concentração de proteína e do pH.

A distinção entre antitixotropia, reopexia e dilatância é importante, embora possa haver sobreposição e confusão terminológica.

- Antitixotropia vs. Dilatância: a antitixotropia é um aumento da viscosidade *dependente do tempo* sob cisalhamento *constante*. A dilatância é um aumento da viscosidade com o *aumento da taxa de deformação*, geralmente considerado uma resposta instantânea ou de estado estacionário, independente do tempo de cisalhamento.
- Antitixotropia vs. Reopexia: ambos envolvem um aumento da viscosidade ou estruturação ao longo do tempo sob cisalhamento. No entanto, a reopexia, como classicamente definida, refere-se à *aceleração* da gelificação ou solidificação por agitação *suave* e ritmada. A antitixotropia é um termo mais geral para o aumento da viscosidade ao longo do tempo sob cisalhamento contínuo, que pode não necessariamente ser suave e pode não levar a uma gelificação completa tão rapidamente. Algumas fontes usam reopexia (ver tópico IX) como sinônimo de antitixotropia ou tixotropia negativa, enquanto outras mantêm distinções mais sutis. Por exemplo, ao discutir fluidos reopexos (usados como sinônimos de antitixotrópicos), menciona que a viscosidade aumenta com o tempo e a taxa de deformação à medida que a microestrutura se quebra e unidades microestruturais maiores se formam. Esta descrição do mecanismo (quebra inicial seguida pela formação de estruturas maiores) sugere uma complexidade que pode variar entre diferentes sistemas antitixotrópicos.

O fenômeno da antitixotropia implica um processo de auto-organização ou estruturação que é induzido ou promovido pelo próprio cisalhamento ao longo do tempo. Em vez de romper uma estrutura preexistente (como na tixotropia) ou causar um espessamento imediato devido ao empacotamento de partículas (como na dilatância), o cisalhamento contínuo parece facilitar a formação de novas interconexões ou arranjos mais ordenados que resultam em maior resistência ao escoamento. O trabalho de Lawrence com magma de magnésia, por exemplo, sugeriu um aumento no valor de

escoamento aparente, indicando o desenvolvimento de uma estrutura interna mais robusta ao longo do tempo de cisalhamento.

A identificação e o estudo da antitixotropia são inerentemente desafiadores devido à sua relativa raridade em comparação com a tixotropia e à sobreposição fenomenológica com outros comportamentos de espessamento dependentes do cisalhamento ou do tempo. Protocolos experimentais precisos e uma análise cuidadosa são necessários para isolar e caracterizar inequivocamente o comportamento antitixotrópico. A raridade e a complexidade da observação podem ter contribuído para um reconhecimento e uma caracterização formal mais tardios em comparação com outros fenômenos não newtonianos. No entanto, o desenvolvimento de modelos constitutivos para a antitixotropia, como os propostos por S. Peter e generalizados por Cheng e Evans, foi um passo importante para fornecer uma base teórica para esse comportamento. Esses modelos, que frequentemente incorporam um parâmetro de estrutura que evolui com o tempo e a taxa de deformação, permitem que o fenômeno seja incorporado em simulações de escoamento e análises de engenharia, mesmo que sua aplicabilidade seja para uma classe mais restrita de materiais. A existência de um arcabouço teórico ajuda a legitimar a antitixotropia como um comportamento reológico distinto e fundamental.

9. REOPEXIA: SOLIDIFICAÇÃO ACELERADA POR AGITAÇÃO SUAVE

A reopexia é um fenômeno reológico dependente do tempo, consideravelmente mais raro e sutil que a tixotropia. É caracterizada pela propriedade de certos fluidos, tipicamente sóis que tendem a gelificar lentamente, de terem sua taxa de solidificação ou o aumento de sua viscosidade acelerados por uma agitação mecânica suave e contínua, como um rolamento ou balanço lento do recipiente. Em essência, enquanto a agitação vigorosa tende a quebrar estruturas em fluidos tixotrópicos, um movimento suave pode, em sistemas reopexos, promover a formação de estrutura e acelerar a transição para um estado mais viscoso ou de gel.

O termo reopexia e a primeira descrição sistemática deste comportamento são amplamente atribuídos a Herbert Freundlich e seu colaborador F. Juliusburger. Eles publicaram um artigo seminal intitulado Rheopexy no Transactions of the Faraday Society em 1935. Embora os fragmentos de pesquisa disponíveis não forneçam o conteúdo detalhado deste artigo específico, ele é consistentemente citado como a referência primária para a definição e as primeiras observações do fenômeno. A própria etimologia do termo (do grego rheos, escoamento, e pexis, fixação ou solidificação) sugere uma solidificação induzida pelo escoamento. O primeiro registro do termo em dicionários técnicos data do período de 1930-1935.

Exemplos clássicos de materiais que podem exibir comportamento reopexo incluem certas pastas de gesso e alguns tipos de lubrificantes e tintas de impressora. É crucial distinguir a reopexia de outros fenômenos de espessamento. Diferentemente da dilatância (espessamento por cisalhamento), que envolve um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de deformação e é geralmente considerada uma resposta independente do tempo de cisalhamento, a reopexia é um fenômeno dependente do tempo e é caracteristicamente promovida por cisalhamento de baixa intensidade ou agitação suave. Uma taxa de deformação muito alta poderia, na verdade, romper as estruturas incipientes em um sistema reopexo, similar ao que ocorre em um sistema tixotrópico.

A relação e a distinção entre reopexia e antitixotropia (ou tixotropia negativa) são mais complexas e, por vezes, fontes de confusão na literatura. Ambos os termos descrevem um aumento da viscosidade ou estruturação ao longo do tempo sob cisalhamento. No entanto, a reopexia, como classicamente definida por Freundlich e Juliusburger, refere-se especificamente à aceleração da gelificação ou solidificação por um movimento suave e ritmado. A antitixotropia é um termo mais geral para qualquer aumento da viscosidade que ocorre ao longo do tempo sob cisalhamento constante, independentemente da intensidade do cisalhamento (desde que não seja tão alto a ponto de causar outros efeitos, como degradação). Alguns autores usam os termos de forma intercambiável, enquanto outros tentam manter uma distinção com base na natureza do cisalhamento indutor ou na resposta específica do material. Por exemplo, descreve a reopexia como um comportamento dilatante dependente do tempo, o que pode adicionar outra camada de interpretação.

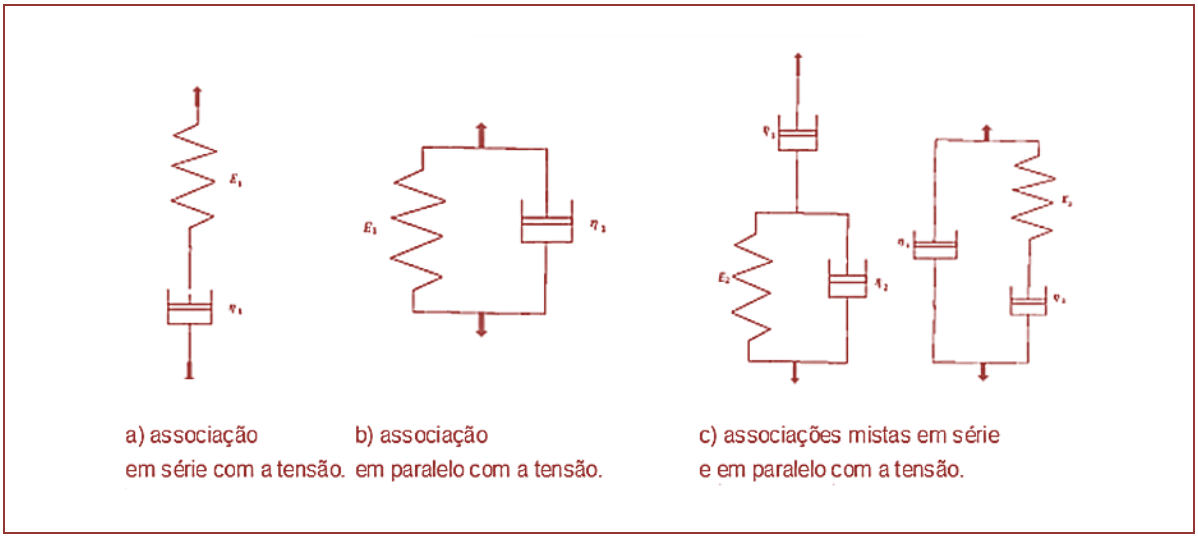
A identificação da reopexia exigiu observações experimentais cuidadosas, focadas no efeito da intensidade e da duração do cisalhamento. O fato de um movimento suave, em vez de vigoroso, promover a estruturação é contraintuitivo quando comparado à tixotropia, em que o cisalhamento geralmente leva à quebra da estrutura. A raridade do fenômeno também sugere que as condições intermoleculares e coloidais necessárias para sua ocorrência são bastante específicas.

Do ponto de vista mecanístico, a reopexia implica que um escoamento de baixa intensidade pode ajudar as partículas ou macromoléculas a superar pequenas barreiras energéticas ou a encontrar orientações favoráveis para a formação de uma rede ou estrutura tridimensional. O movimento suave poderia facilitar contatos interpartículas que, de outra forma, ocorreriam muito mais lentamente apenas por difusão Browniana, ou que seriam impedidos por pequenas forças repulsivas que o escoamento suave ajuda a superar. Escoamentos mais intensos, por outro lado, imporiam forças hidrodinâmicas dominantes que impediriam a formação dessas estruturas delicadas ou as romperiam. O estudo da reopexia, mesmo sendo um fenômeno menos comum, contribui para uma compreensão mais profunda e matizada de como as interações interpartículas e a cinética de formação de estruturas em sistemas coloidais e poliméricos são influenciadas por campos de escoamento externos, revelando detalhes sobre potenciais de interação e caminhos de agregação que podem não ser evidentes em sistemas tixotrópicos ou dilatantes mais comuns.

10. VISCOELASTICIDADE: O COMPORTAMENTO DUAL ELÁSTICO-VISCOSO

A viscoelasticidade descreve materiais que exibem simultaneamente características de sólidos elásticos ideais (que armazenam energia de deformação e retornam à sua forma original após a remoção de uma tensão, como uma mola) e de fluidos viscosos ideais (que dissipam energia como calor e fluem irreversivelmente sob tensão, como um amortecedor). Quando um material viscoelástico é deformado, parte da energia é armazenada (componente elástica) e parte é dissipada (componente viscosa). Na Figura 12, são mostrados alguns exemplos da possibilidade de associação entre esses dois modelos mecânicos. Este comportamento dual leva a fenômenos característicos como a histerese na curva tensão-deformação durante carregamento e descarregamento cíclicos, a relaxação de tensão (diminuição da tensão ao longo do tempo sob deformação constante) e a fluência (aumento da deformação ao longo do tempo sob tensão constante).

Figura 12. Algumas possibilidades de associação entre mola e amortecedor para representar o comportamento viscoelástico.



As primeiras observações e a conceituação da viscoelasticidade datam do século XIX, com contribuições fundamentais de vários físicos proeminentes que investigavam o comportamento mecânico de diversos materiais.

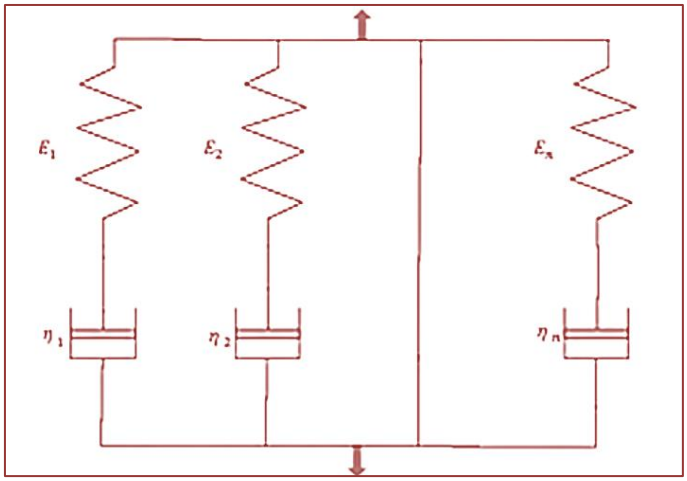
Um dos primeiros reconhecimentos sistemáticos do comportamento viscoelástico veio do físico alemão Wilhelm Weber. Em 1835, ao estudar a elasticidade de fios de seda, Weber observou que a aplicação de uma carga não apenas produzia uma extensão elástica imediata, mas também um alongamento contínuo e lento ao longo do tempo (fluência). Além disso, após a remoção da carga, havia uma recuperação elástica imediata seguida por uma recuperação gradual adicional ao longo do tempo (efeito elástico retardado ou recuperação de fluência). Este trabalho, publicado no *Annalen der Physik Poggendorff*, demonstrou que a resposta de um material à tensão podia ser dependente do tempo e não ser puramente elástica nem puramente viscosa. Esse tipo de resposta pode ser representado pelo modelo da associação em série entre mola e amortecedor, Figura 12.a, o qual foi proposto por Maxwell.

O físico escocês James Clerk Maxwell, em seu artigo de 1867, On the Dynamical Theory of Gases, publicado no *Philosophical Transactions of the Royal Society*, introduziu um modelo conceitual para descrever o comportamento de um material viscoelástico. Este modelo, hoje conhecido como Modelo de Maxwell, consiste em uma mola puramente elástica e um amortecedor puramente viscoso conectados em série. Maxwell propôs uma relação entre tensão e deformação que incluía uma força restauradora que relaxava com o tempo. Fundamentalmente, ele introduziu o conceito de tempo de relaxação ($\lambda = \eta/E$), em que η é a viscosidade e E é o módulo de elasticidade), que representa a escala de tempo característica para a dissipação de tensões no material. Se um material Maxwell é submetido a uma deformação súbita e mantida constante, a tensão inicialmente induzida decairá exponencialmente com o tempo, com uma taxa determinada pelo tempo de relaxação. Já o físico britânico William Thomson (mais tarde Lord Kelvin), em seu artigo de 1865, On the Elasticity and Viscosity of Metals, publicado no *Proceedings of the Royal Society*, investigou as propriedades elásticas e viscosas dos metais. O modelo que hoje é conhecido como elemento Kelvin (ou Voigt ou Kelvin-Voigt), consistindo em uma mola e um amortecedor conectados em paralelo (Figura 12b), é atribuído tanto a Kelvin quanto,

independentemente, ao físico alemão Woldemar Voigt, em seus trabalhos sobre o atrito interno em sólidos, particularmente cristais (Ueber die innere Reibung der festen Körper, insbesem quere der Krystalle, 1890, e um artigo similar no Annalen der Physik, 1892. Esse modelo descreve um sólido viscoelástico que exibe uma resposta elástica retardada (fluência) sob carga constante e uma recuperação incompleta ou retardada após a remoção da carga além da dependência da rigidez com a taxa de deformação. Um material viscoelástico que siga o modelo de Kelvin-Voigt é puramente elástico em longas escalas de tempo (deformação lenta), mas exibe resistência adicional à deformação rápida devido ao componente viscoso. Ao final do Século XIX, o físico austríaco Ludwig Boltzmann fez contribuições teóricas profundas para a viscoelasticidade. Em seu trabalho de 1874, Zur Theorie der elastischen Nachwirkungen (Sobre a Teoria dos Efeitos Elásticos Retardados), publicado no *Sitzungsberichte Kaiserliche Akademie der Wissenschaften Wien*, Boltzmann desenvolveu a teoria matemática da viscoelasticidade linear. Sua contribuição mais duradoura neste contexto é o Princípio da Superposição de Boltzmann. Esse princípio estabelece que, para um material viscoelástico linear, a deformação total resultante de uma história de tensões complexa e variável no tempo é a soma das deformações que seriam causadas por cada incremento de tensão individualmente, como se cada um atuasse isoladamente na história do material. Isso implica que a resposta do material a uma carga depende de toda a sua história de carregamento anterior, com uma memória que se desvanece com o tempo.

No início do século XX, outros pesquisadores continuaram a desenvolver esses conceitos como o geofísico alemão Emil Wiechert, que em seu trabalho Ueber elastische Nachwirkung (Sobre o Efeito Elástico Retardado), publicado no *Zeitschrift für Instrumentenkunde* , propôs um modelo para descrever a viscoelasticidade que consistia em uma série de elementos de mola e amortecedor, essencialmente um espectro de tempos de relaxação, generalizando o modelo de Maxwell (ver Figura 13). Ele aplicou essas ideias para modelar o comportamento viscoelástico do interior da Terra, particularmente seu manto, para explicar fenômenos geofísicos.

Figura 13. Modelo de Wiechert ou de Maxwell generalizado.



J.H. Poynting e J.J. Thomson (1902), no livro, A Text-book of Physics: Properties of Matter, esses físicos britânicos forneceram uma síntese do conhecimento da época sobre as propriedades da matéria, incluindo discussões sobre elasticidade e viscosidade que,

implicitamente, cobriam fenômenos que hoje seriam classificados como viscoelásticos. O trabalho do químico alemão Hermann Staudinger sobre a natureza macromolecular dos polímeros foi revolucionário e teve um impacto profundo na compreensão da viscoelasticidade. Antes de Staudinger, materiais como borracha natural, celulose e os primeiros plásticos sintéticos eram frequentemente considerados agregados coloidais de pequenas moléculas. Staudinger postulou que eram, na verdade, macromoléculas representadas por cadeias muito longas de unidades repetitivas (meros) ligadas covalentemente. As propriedades mecânicas únicas desses materiais, como sua alta elasticidade combinada com comportamento de escoamento (o que era pejorativamente chamado de *Schmierenchemie* (química da graxa em alemão), eram difíceis de explicar pelas teorias existentes. Staudinger usou estudos de viscosidade de soluções poliméricas para argumentar a favor de altos pesos moleculares e para mostrar que esses pesos permaneciam inalterados durante modificações químicas, apoiando a ideia de entidades moleculares estáveis e grandes. Embora Staudinger não tenha focado primariamente na modelagem matemática da viscoelasticidade, suas descobertas sobre a estrutura dos polímeros forneceram a base material para grande parte da pesquisa subsequente em viscoelasticidade, pois os polímeros são exemplos por excelência de materiais viscoelásticos.

A compreensão da viscoelasticidade, portanto, evoluiu da observação de que nem todos os sólidos se comportavam de maneira perfeitamente elástica (hookeana) nem todos os líquidos de maneira perfeitamente viscosa (newtoniana) sob todas as condições, especialmente quando a dimensão temporal da deformação e da resposta era considerada. Este campo de estudo preencheu uma lacuna conceitual entre os dois comportamentos mecânicos idealizados, mostrando que muitos materiais reais existem em um espectro entre eles.

Os primeiros modelos de viscoelasticidade, como os de Maxwell e Kelvin-Voigt, eram lineares e baseados em combinações relativamente simples de elementos mecânicos ideais (molas para representar a elasticidade e amortecedores para representar a viscosidade). Embora fossem simplificações da realidade complexa, esses modelos forneceram a primeira estrutura matemática para quantificar e prever o comportamento viscoelástico. Eles permitiram a definição de conceitos fundamentais como tempo de relaxação (a rapidez com que a tensão em um material deformado diminui) e tempo de retardamento (a rapidez com que a deformação sob fluência ocorre sob tensão constante), que forma a base para caracterizar materiais viscoelásticos e ainda hoje são usados como ponto inicial para modelos mais sofisticados.

O desenvolvimento da ciência dos polímeros, impulsionado significativamente pelo trabalho pioneiro de Staudinger no século XX, forneceu uma vasta e diversificada classe de materiais que exibiam comportamento viscoelástico de forma proeminente. A natureza de cadeia longa, a flexibilidade e o emaranhamento das macromoléculas eram intrinsecamente adequados para exibir efeitos de memória e uma forte dependência da resposta mecânica em relação ao tempo e à taxa de deformação. Isso, por sua vez, impulsionou enormemente a pesquisa teórica e experimental no campo da viscoelasticidade, pois os cientistas e engenheiros buscavam entender e prever o comportamento desses novos e versáteis materiais.

O Princípio da Superposição de Boltzmann foi, e continua sendo, uma contribuição teórica de imenso poder para a viscoelasticidade linear. Sua importância reside no fato de que ele permite que a resposta complexa de um material viscoelástico linear a uma história arbitrária de tensão (ou deformação) ao longo do tempo seja prevista a partir de

resultados de experimentos relativamente simples, como um teste de fluência (deformação sob tensão constante) ou um teste de relaxação de tensão (tensão sob deformação constante). Desde que o material permaneça dentro de sua região de resposta linear, a função de relaxação ou a função de complacência de fluência contêm toda a informação necessária para prever seu comportamento sob qualquer outra história de carregamento. Isso simplificou enormemente a análise e a caracterização de materiais viscoelásticos lineares.

A tabela abaixo resume os principais modelos constitutivos discutidos

Tabela 2: Modelos Constitutivos Fundamentais para Fluidos Não newtonianos e Viscoelásticos

Nome do Modelo	Equação Constitutiva (forma escalar simplificada)	Parâmetros do Modelo	Fenômeno(s) Principal(is) Descrito(s)
newtoniano	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	μ (viscosidade dinâmica)	Escoamento viscoso linear
Bingham	$\tau = \tau_y + \mu_p\dot{\gamma}$	τ_y (Tensão residual) e μ_p (Viscosidade plástica)	Tensão de escoamento ou residual
Ostwald-de Waele (Lei de Potência)	$\tau = K(\dot{\gamma})^n$	K (índice de consistência), n (índice de escoamento)	Pseudoplasticidade (n<1), dilatância (n>1), newtoniano (n=1)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_y + K(\dot{\gamma})^n$	K (Índice de consistência), n (Índice da potência) e τ_y	Tensão de escoamento ou residual, pseudoplasticidade ou dilatância
Maxwell (elemento)	$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$ ou $\sigma + \lambda\,\dot{\sigma} = \eta\dot{\epsilon}(em\ que\ \lambda = \eta/E)$	E (módulo de elasticidade), η (viscosidade), λ (tempo de relaxação)	Relaxação de tensão, comportamento fluido em longos tempos
Kelvin-Voigt (elemento)	$\sigma = E\epsilon + \eta\dot{\epsilon}$	E, η	Fluência (creep), comportamento sólido em longos tempos, retardo elástico

Nota: τ é a tensão de cisalhamento,$\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação.Para os modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt,σ é a tensão,ϵ é a deformação,$\dot{\sigma}$ e ($\dot{\epsilon}$ são suas taxas temporais.)

11. CONCLUSÃO

A compreensão do conceito da viscosidade, desde o trabalho pioneiro de Isaac Newton até a identificação e caracterização dos diversos e complexos fenômenos não newtonianos e viscoelásticos, mostra como pode ser notável a evolução no pensamento científico em qualquer área. Newton, ao postular uma relação linear simples entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, não apenas forneceu a primeira descrição quantitativa da resistência interna ao escoamento dos fluidos, mas também estabeleceu um paradigma, o do fluido newtoniano, que serviu como referência por séculos. Esta notável simplificação propiciou o desenvolvimento da mecânica dos fluidos clássica e das equações de Navier-Stokes. No entanto, à medida que a ciência e a tecnologia avançavam, tornou-se cada vez mais evidente que um vasto número de fluidos, tanto naturais quanto sintéticos, não se conformava com esse modelo ideal. As observações de comportamentos, na época considerados anômalos, nos quais fluidos apresentavam viscosidade que mudava com a taxa de deformação, com o tempo de cisalhamento ou que exibiam um limiar para o escoamento,acumularam-se, particularmente em sistemas coloidais, suspensões, soluções poliméricas e materiais biológicos. O reconhecimento da complexidade levou ao nascimento da reologia como um campo de estudo distinto,

formalizado no início do século XX com as contribuições de figuras como Bingham e Reiner. A reologia não apenas deu um nome a esses fenômenos, mas também forneceu o arcabouço conceitual e experimental para investigá-los sistematicamente.

A identificação e a primeira caracterização isolada de cada comportamento não newtoniano representaram marcos significativos. A descoberta da **viscoplasticidade** por pioneiros como Schwedoff e Bingham, e sua posterior generalização por Herschel e Bulkley, introduziu o conceito da tensão de escoamento, revelando que alguns materiais podem transitar entre um comportamento semelhante ao sólido e ao fluido. A pseudoplasticidade e a dilatância, modeladas inicialmente pela lei de potência de Wilhelm Ostwald e Armand de Waele, e com contribuições anteriores de Reynolds para a dilatância granular, mostraram que a viscosidade poderia ser uma função intrínseca da intensidade do escoamento. Fenômenos dependentes do tempo como a tixotropia, elucidada por Péterfi e Freundlich, e a mais rara reopexia, também investigada por Freundlich e Juliusburger, destacaram a importância da história do cisalhamento e da cinética de formação e quebra de estruturas internas. A antitixotropia, ou tixotropia negativa, observada por pesquisadores como Lawrence, adicionou outra camada de complexidade, mostrando que o cisalhamento poderia, em alguns casos, induzir um aumento da estrutura e da viscosidade ao longo do tempo.

Paralelamente, a compreensão da viscoelasticidade evoluiu a partir das observações de Weber sobre o efeito retardado em fios de seda, passando pelos modelos fundamentais de Maxwell e Kelvin-Voigt, pelo princípio da superposição de Boltzmann, culminando com o reconhecimento do comportamento viscoelástico intrínseco dos polímeros, impulsionado pelo trabalho de Staudinger. Esses desenvolvimentos preencheram a lacuna entre sólidos elásticos ideais e fluidos viscosos ideais, revelando que muitos materiais exibem uma combinação desses comportamentos.

A transição de uma visão puramente macroscópica e fenomenológica da viscosidade, característica do trabalho inicial de Newton, para uma que progressivamente incorporou considerações sobre a microestrutura dos materiais foi fundamental. A explicação para os diversos comportamentos não newtonianos e viscoelásticos reside, em última análise, nas interações entre partículas, no arranjo e na dinâmica de macromoléculas, e na formação e rompimento de redes e estruturas internas em resposta ao escoamento.

A importância desses conceitos pioneiros e de sua evolução subsequente não pode ser subestimada. O entendimento da viscosidade Newtoniana e, fundamentalmente, dos diversos comportamentos não newtonianos e viscoelásticos é hoje fundamental em inúmeras áreas da ciência e da engenharia. Desde o processamento de alimentos, produtos farmacêuticos e cosméticos, passando pela fabricação de plásticos, tintas e materiais de construção, até a modelagem de escoamentos geofísicos (como lava e deslizamentos de terra) e a compreensão de processos biológicos (como o escoamento sanguíneo e o movimento do citoplasma), o controle e a previsão do comportamento reológico são indispensáveis. A jornada iniciada por Newton continua, com a reologia moderna buscando desvendar relações ainda mais profundas entre microestrutura e comportamento macroscópico e desenvolvendo novas ferramentas experimentais e teóricas para lidar com materiais cada vez mais complexos e aplicações inovadoras. A base lançada por esses pioneiros permanece como o alicerce sobre o qual este campo vibrante e essencial continua a se construir.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

[1] AFT. **Bingham Plastic Model**. [S. l.]: AFT, [s.d.]. Disponível em: https://docs.aft.com/impulse10/Bingham-Plastic-Model.html. Acesso em: 16 jun. 2025.
[2] AEROSPACE ENGINEERING. **Viscoelasticity**. [S. l.]: Softecks.in, [s.d.]. Disponível em: https://aerospaceengineering.softecks.in/1129/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[3] AGARWAL, Mayank et al. Distinguishing thixotropy from viscoelasticity. **arXiv**, 2021. Disponível em: https://home.iitk.ac.in/~vshankar/mypapers/web_Agarwal_etal_JoR_2021.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[4] AGUZZI, C. et al. Networking and rheology of concentrated clay suspensions matured in mineral medicinal water. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 453, n. 2, p. 473–479, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.06.002. Acesso em: 16 jun. 2025.
[5] ARANGO-RESTREPO, Andrés. **Non-Equilibrium Self-Assembly**: Formation and Function of Meso-Structures with Applications in Biology and Material Science. [201-?]. Tese (Doutorado) – Universitat de Barcelona, Barcelona, [s.d.]. Disponível em: https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/193113/1/AAR_PhD_THESIS.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[6] ASSIS, Andre. Wilhelm Weber's works translated into English. **21st Century Science & Technology**, v. 22, p. 67-69, 2010. Disponível em: https://21sci-tech.com/Subscriptions/Winter-2009_ONLINE/Weber_Bibliography.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[7] BADINO, Massimiliano. Mechanistic Slumber vs. Statistical Insomnia: The early phase of Boltzmann's H-theorem (1868-1877). **European Physical Journal - H**, v. 36, n. 3, p. 353-378, 2011.
[8] BARNES, Howard A. The yield stress - a review or `panta roi' everything flows? **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 81, p. 133–178, 1999.
[9] BINGHAM, E. C. **An Investigation of the Laws of Plastic Flow**. Bulletin of the Bureau of Standards, 13, 309-353, 1916. Disponível em: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/13/nbsbulletinv13n2p309_A2b.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[10] BOSWELL, Percy George Hamnall. A preliminary examination of the thixotropy of some sedimentary rocks. **Journal of the Geological Society**, v. 104, n. 1-4, p. 499-521, [1948]. Disponível em: https://jgs.lyellcollection.org/content/104/1-4/499.full.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[11] BROWN, Eric; JAEGER, Heinrich M. Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms, and relations to jamming. Chicago: The James Franck Institute, [s.d.]. Disponível em: https://jfi.uchicago.edu/~jaeger/group/JaegerGroupPapers/suspensions/BJ12_RoPP_revised_red.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[12] BURGESON, Eric; ROGERS, Simon. Decoupling elastic and viscous effects in thixotropy and a cautionary tale for interpretation of the dynamic moduli. **Journal of Rheology**, v. 69, p. 281-295, 2025. Disponível em: https://pubs.aip.org/sor/jor/article-pdf/20456145/281_1_8.0000973.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[13] CHAPMAN, G. **THE THIXOTROPY AND DILATANCY OF A MARINE SOIL**. [Plymouth]: Plymouth University, [s.d.]. Disponível em: https://plymsea.ac.uk/id/eprint/1347/1/The_thixotropy_and_dilatancy_of_a_marine_soil.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[14] CHENG, D.; EVANS, F. Phenomenological Characterization of the Rheological Behaviour of Inelastic Reversible Thixotropic and Antithixotropic Fluids. **British Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 11, p. 1599, 2002.
[15] CHRISTOV, Ivan; JORDAN, Pedro. Maxwell's other equations. **Royal Society Blog**, 21 set. 2015. Disponível em: https://royalsociety.org/blog/2015/09/maxwells-other-equations/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[16] COOKE, M. E.; ROSENZWEIG, D. H. The rheology of direct and suspended extrusion bioprinting. **APL Bioengineering**, v. 5, n. 1, p. 011502, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1063/5.0031475. Acesso em: 16 jun. 2025.
[17] CORRY, Leo. **THE ORIGIN OF HILBERT'S AXIOMATIC METHOD**. [S. l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://www.tau.ac.il/~corry/publications/articles/pdf/Hilbert%20Kluwer.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[18] DAVIES, G. A.; STOKES, Jason. Thin film and high shear rheology of multiphase complex fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 148, p. 73-87, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223792010_Thin_film_and_high_shear_rheology_of_multiphase_complex_fluids. Acesso em: 16 jun. 2025.

[19] DONLEY, G. J. et al. Elucidating the G″ overshoot in soft materials with a yield transition via a time-resolved experimental strain decomposition. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 36, p. 21945-21952, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.2003869117. Acesso em: 16 jun. 2025.
[20] DORAISWAMY, Deepak. **The Origins of Rheology**: A Short Historical Excursion. [S. l.]: DuPont iTechnologies, Experimental Station, [s.d.]. Disponível em: https://pages.mtu.edu/~fmorriso/cm4650/HistoryOfRheology.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[21] EBSCO RESEARCH STARTERS. **Non-Newtonian fluid**. [S. l.]: EBSCO, [s.d.]. Disponível em: https://www.ebsco.com/research-starters/science/non-newtonian-fluid. Acesso em: 16 jun. 2025.
[22] EL TANI, M. Flow Rate of the Radial Injection of Cement Mix in a Rock Fracture. **Civil Engineering Research Journal**, v. 5, n. 2, p. 555657, 2018. DOI: 10.19080/CERJ.2018.05.555657.
[23] EWOLDT, R. H.; McKINLEY, G. H. Mapping thixo-elasto-visco-plastic behavior. **Rheologica Acta**, v. 56, n. 3, p. 195-210, 2017.
[24] GIANNOTTI, Marina; VANCSO, Gyula. Interrogation of Single Synthetic Polymer Chains and Polysaccharides by AFM-Based Force Spectroscopy. **ChemPhysChem**, v. 8, n. 16, p. 2290-2307, 2007. DOI: 10.1002/cphc.200700175.
[25] HAMILTON, G.; DISHAROON, Z.; SANABRIA, H. Revisiting viscosity from macroscopic to nanoscale regimes. **Revista Mexicana de Física E**, México, v. 64, n. 2, p. 222-231, dez. 2018. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35422018000200222&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 16 jun. 2025.
[26] ILYIN, S. O. Structural Rheology in the Development and Study of Complex Polymer Materials. **Polymers**, v. 16, n. 17, p. 2458, 2024. DOI: 10.3390/polym16172458.
[27] JACKSON, J. D. **THE LIFE AND WORK OF OSBORNE REYNOLDS**. Trabalho apresentado no: 4th OR Colloquium, 2006, Imperial College, Londres. Disponível em: https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/jdjackson/7%20%204th%20OR%20Colloquium,%20Imperial%20College,%20April%202006%20FV.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[28] JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION. **Introducing Students to Rheological Classification of Foods, Cosmetics, and Pharmaceutical Excipients Using Common Viscous Materials**. Journal of Chemical Education, v. 92, n. 5, p. 936-939, 2015. Disponível em: https://pendidikankimia.walisongo.ac.id/wp-content/uploads/2018/10/33-4.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[29] JONES, Mark. History Of Rheology. In: **ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS (EOLSS)**. Oxford: EOLSS Publishers, 2005. Disponível em: http://www.eolss.net/sample-chapters/c06/e6-197-01.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[30] KARATO, Shun-ichiro. Rheology of the Earth's mantle: A historical review. **Gondwana Research**, v. 18, n. 1, p. 17-45, 2010. DOI: 10.1016/j.gr.2010.03.004.
[31] KRAUS, S. D. GLYCYRRHETINIC ACID—A TRITERPENE WITH ANTI-OESTROGENIC AND ANTI-INFLAMMATORY ACTIVITY. **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 12, p. 300-306, 1960. DOI: 10.1111/j.2042-7158.1960.tb12667.x.
[32] LARSON, Ronald; WEI, Yufei. A review of thixotropy and its rheological modeling. **Journal of Rheology**, v. 63, p. 477-501, 2019. DOI: 10.1122/1.5055031. Disponível em: https://pubs.aip.org/sor/jor/article-pdf/63/3/477/19751059/477_1_1.5055031.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[33] LIU, H. et al. Shear Thickening Mechanism. In: **ENCYCLOPEDIA**. [S. l.]: [s.n.], 2023. Disponível em: https://encyclopedia.pub/entry/45124. Acesso em: 16 jun. 2025.
[34] MACKELLAR, Colin. Kelvin on the sun. In: **MacTutor History of Mathematics**. St Andrews: University of St Andrews, [s.d.]. Disponível em: https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Extras/Kelvin_sun_1/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[35] MALVERN PANALYTICAL. **Rheology and Theology make a biblical connection**. [S. l.]: Malvern Panalytical, [s.d.]. Disponível em: https://www.malvernpanalytical.com/en/learn/knowledge-center/insights/rheology-and-theology-make-a-biblical-connection. Acesso em: 16 jun. 2025.
[36] MARI, Romain et al. Shear thickening, frictionless and frictional rheologies in non-Brownian suspensions. **Journal of Rheology**, v. 58, n. 6, p. 1693–1724, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1122/1.4890747. Acesso em: 16 jun. 2025.
[37] MAXWELL, James Clerk. **On the Dynamical Theory of Gases**. [S. l.]: Manhattan Rare Book Company, [1866]. Disponível em: https://www.manhattanrarebooks.com/pages/books/2274/james-clerk-maxwell/on-the-dynamical-theory-of-gases?soldItem=true. Acesso em: 16 jun. 2025.
[38] MORENO, Elvira; DIALAMI, Narges; CERVERA, Miguel. Modeling of spillage and debris floods as Newtonian and viscoplastic Bingham flows with free surface with mixed stabilized finite elements.

Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 290, p. 104512, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104512. Acesso em: 16 jun. 2025.
[39] MÜLHAUPT, Rolf. Hermann Staudinger and the Origin of Macromolecular Chemistry. **Angewandte Chemie (International Ed. in English)**, v. 43, n. 9, p. 1054-1063, 2004. DOI: 10.1002/anie.200330070.
[40] MYSLYUK, M. A.; VOLOSHYN, Yu. D.; ZHOLOB, N. R. ASSESMENT OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DRILLING FLUIDS BASED ON ROTATIONAL VISCOMETRY DATA. **SOCAR Proceedings Special Issue**, n. 2, p. 041-053, 2023. Disponível em: https://proceedings.socar.az/en/journal/94. Acesso em: 16 jun. 2025.
[41] NAVARRO, R. F., (1997), Fundamentos de Reologia de Polímeros, EDUCS, Caxias do Sul.
[42] NEWTON, Isaac. **Princípios Matemáticos da Filosofia Natural: Livro II - O Movimento de Corpos Resistidos**. Tradução de Roberto de Andrade Martins et al. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.
[43] PARTAL, Pedro; FRANCO, José Mª. NON-NEWTONIAN FLUIDS. In: **RHEOLOGY - Vol. I - Non-Newtonian Fluids**. [S. l.]: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), [s.d.].
[44] POYNTING, John Henry; THOMSON, Joseph John. **A Text-book of Physics**: Properties of Matter. [S. l.]: Google Books, [s.d.]. Disponível em: https://books.google.com/books/about/A_Text_book_of_Physics_Properties_of_Mat.html?id=A6ELAAAAYAAJ. Acesso em: 16 jun. 2025.
[45] PRADEEP, S.; ARRATIA, P. E.; JEROLMACK, D. J. Origins of complexity in the rheology of Soft Earth suspensions. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 7432, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-024-51357-y. Acesso em: 16 jun. 2025.
[46] RICE, James Robert. mechanics of solids. In: **ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA**. [S. l.]: Encyclopaedia Britannica, 2017. Disponível em: https://www.britannica.com/science/mechanics-of-solids/Viscoelasticity. Acesso em: 16 jun. 2025.
[47] RIGHI, Michele; BALBI, Valentina. Foundations of viscoelasticity and application to soft tissues mechanics. **arXiv**, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2108.08078.
[48] SASAKI, Tunetaka; MIYAMOTO, Shigeru; MORINAGA, Yasuko. Thixotropy of Alginate Gels. **Bulletin of the Chemical Society of Japan**, v. 29, n. 1, p. 32-35, jan. 1956. Disponível em: https://doi.org/10.1246/bcsj.29.32. Acesso em: 16 jun. 2025.
[49] SATHEE - PRUTOR. **Physics Newtons Law Of Viscosity**. [S. l.]: Sathee - Prutor, [s.d.]. Disponível em: https://sathee.prutor.ai/article/physics/physics-newtons-law-of-viscosity/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[50] SCHASCHKE, C. Ostwald-de Waele equation. In: **A Dictionary of Chemical Engineering**. [S. l.]: Oxford University Press, 2014. Disponível em: https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199651450.001.0001/acref-9780199651450-e-2069. Acesso em: 16 jun. 2025.
[51] SCHROEDER, Wilfried. Some Aspects in Emil Wiechert. [S. l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: http://verplant.org/history-geophysics/Wiechert.htm. Acesso em: 16 jun. 2025.
[52] SCIENCE HISTORY INSTITUTE. **Hermann Staudinger**. [S. l.]: Science History Institute, [s.d.]. Disponível em: https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/hermann-staudinger/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[53] STAUDINGER, Hermann. **The Foundation of Polymer Science by Hermann Staudinger (1881-1965)**. [S. l.]: American Chemical Society, 1999. Disponível em: https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/staudingerpolymerscience.html. Acesso em: 16 jun. 2025.
[54] TAYLOR & FRANCIS. **Bingham plastic – Knowledge and References**. [S. l.]: Taylor & Francis, [s.d.]. Disponível em: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Materials_science/Bingham_plastic/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[55] TAYLOR & FRANCIS. **Power-law fluid**. [S. l.]: Taylor & Francis, [s.d.]. Disponível em: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Materials_science/Power-law_fluid/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[56] TAYLOR-WEST, J. J.; HOGG, A. J. Scraping of a thin layer of viscoplastic fluid. **Physical Review Fluids**, v. 9, n. 5, p. 053301, 2024.
[57] THOMSON, William. On the elasticity and viscosity of metals. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 14, p. 289-297, 1865. Disponível em: http://doi.org/10.1098/rspl.1865.0052. Acesso em: 16 jun. 2025.
[58] TKALČIĆ, Hrvoje. On the History of Inner Core Discovery. In: **[Título do Livro/Obra Principal da Cambridge University Press]**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. Disponível em:

https://assets.cambridge.org/97811070/37304/excerpt/9781107037304_excerpt.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[59] YUSOF, F. A. Amat et al. Rheopectic Behavior for Aqueous Solutions of Megamolecular Polysaccharide Sacran. **Biomolecules**, v. 10, n. 1, p. 155, 2020. DOI: 10.3390/biom10010155.
[60] VOIGT, W. Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elastizita tskonstanten isotroper Korper. **Annalen der Physik**, v. 38, p. 573-587, 1889. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1002/andp.18892741206. Acesso em: 16 jun. 2025.
[61] VOIGT, W. über Innere Reibung der Festen Korper, Insbesem quere der Metalle. **Annalen der Physik**, v. 47, p. 671-639, 1892. Disponível em: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2026511. Acesso em: 16 jun. 2025.
[62] WAELE, A. **Viscometry and Plastometry**. [S. l.]: Oil and Colour Chemists' Association, 1923.
[63] WANG, B. et al. Experimental study on the thixotropic strength of the marine soft clay from the Yangtze River estuary. **Frontiers in Marine Science**, v. 11, 2024. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2024.1462550/full. Acesso em: 16 jun. 2025.
[64] WANG, Yilin; EWOLDT, Randy. Thixotropy, antithixotropy, and viscoelasticity in hysteresis. **Journal of Rheology**, v. 67, p. 1199-1219, 2023. DOI: 10.1122/8.0000620. Disponível em: https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/lmjmXWE9/. Acesso em: 16 jun. 2025.
[65] WEI, L. et al. An investigation on the thixotropic parameters and mechanical properties of loess. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, 2023. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2023.1240799/epub. Acesso em: 16 jun. 2025.
[66] WEBER, Wilhelm. On Galvanometry. [S. l.]: [s.n.], 1862. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~assis/1862-Weber-Galvanometrie.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.
[67] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Bingham plastic. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 25 mar. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bingham_plastic&oldid=1282271871. Acesso em: 16 jun. 2025.
[68] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Emil Wiechert. In: **Wikipedia**, A Enciclopédia Livre, 29 fev. 2024. Disponível em: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Emil_Wiechert&oldid=242685941. Acesso em: 16 jun. 2025.
[69] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Herschel–Bulkley fluid. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 13 jun. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Herschel%E2%80%93Bulkley_fluid&oldid=1295361010. Acesso em: 16 jun. 2025.
[70] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. James Clerk Maxwell. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 15 jun. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=James_Clerk_Maxwell&oldid=1295661086. Acesso em: 16 jun. 2025.
[71] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Kelvin–Voigt material. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 24 mai. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kelvin%E2%80%93Voigt_material&oldid=1292049714. Acesso em: 16 jun. 2025.
[72] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Markus Reiner. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 27 mai. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Markus_Reiner&oldid=1292577059. Acesso em: 16 jun. 2025.
[73] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Non-Newtonian fluid. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 14 jun. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-Newtonian_fluid&oldid=1295627181. Acesso em: 16 jun. 2025.
[74] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Power-law fluid. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 20 fev. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power-law_fluid&oldid=1276799107. Acesso em: 16 jun. 2025.
[75] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Rheology. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 23 mai. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rheology&oldid=1291789350. Acesso em: 16 jun. 2025.
[76] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Rheopecty. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 16 jun. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rheopecty&oldid=1295982846. Acesso em: 16 jun. 2025.
[77] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Thixotropy. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 23 mai. 2025.

Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thixotropy&oldid=1291806879. Acesso em: 16 jun. 2025.
[78] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Time-dependent viscosity. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 26 mai. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Time-dependent_viscosity&oldid=1292395586. Acesso em: 16 jun. 2025.
[79] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Viscoelasticity. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 23 mai. 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Viscoelasticity&oldid=1291750358. Acesso em: 16 jun. 2025.
[80] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Viscoplasticity. In: **Wikipedia**, The Free Encyclopedia, 28 ago. 2024. Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Viscoplasticity&oldid=1242773249. Acesso em: 16 jun. 2025.
[81] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Woldemar Voigt (físico). In: **Wikipedia**, A Enciclopédia Livre, 18 jan. 2025. Disponível em: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Woldemar_Voigt_(Physiker)&oldid=252372152. Acesso em: 16 jun. 2025.
[82] ZHANG, J. et al. Spreading Kinetics of Herschel-Bulkley Fluids Over Solid Substrates. **Frontiers in Physics**, v. 8, p. 609926, 2020. DOI: 10.3389/fphy.2020.609926.
[83] ZHOU, H. et al. Study of Thixotropic Characteristics of a Kerosene Gel Propellant by Bayesian Optimization. **Gels (Basel, Switzerland)**, v. 9, n. 1, p. 15, 2022. DOI: 10.3390/gels9010015

CAPÍTULO

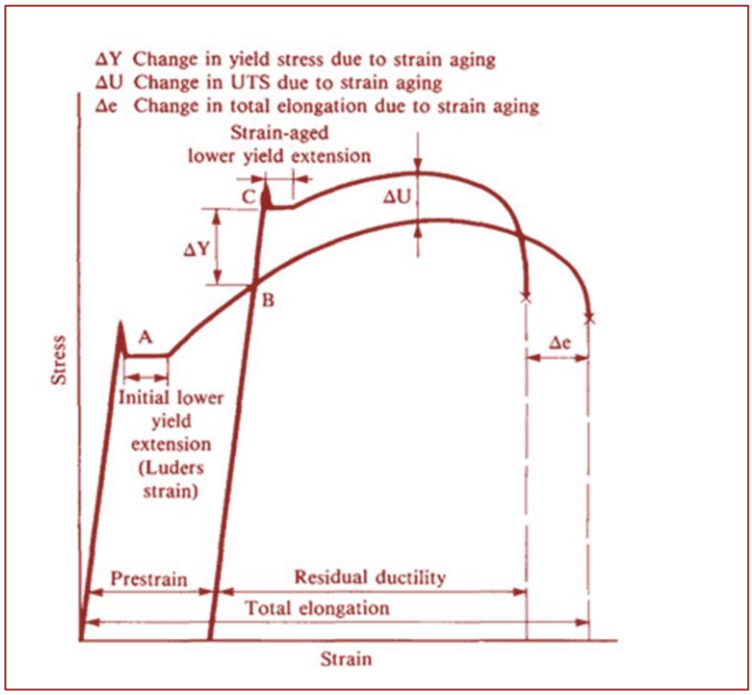
11 Envelhecimento por deformação e seu impacto na tensão de escoamento de materiais metálicos

Resumo: O envelhecimento por deformação é um processo metalúrgico que ocorre em ligas metálicas, como os aços, e se manifesta após o material ter sofrido deformação plástica e ser exposto a um período de repouso ou aquecimento moderado. Ele envolve a interação entre defeitos na estrutura cristalina, conhecidos como discordâncias, e átomos de soluto intersticiais, como carbono e nitrogênio. Essa interação leva à formação de "atmosferas de Cottrell" em torno das discordâncias, que as ancoram e dificultam seu movimento. A consequência mais notável desse fenômeno é o aumento da tensão de escoamento do material, que frequentemente se manifesta como o reaparecimento de um ponto de escoamento descontínuo. No entanto, o envelhecimento por deformação geralmente resulta em uma redução indesejável da ductilidade e da tenacidade, o que pode comprometer a segurança de componentes estruturais, embora possa ser controlado e utilizado de forma benéfica pela indústria automobilística, por exemplo.

1. INTRODUÇÃO

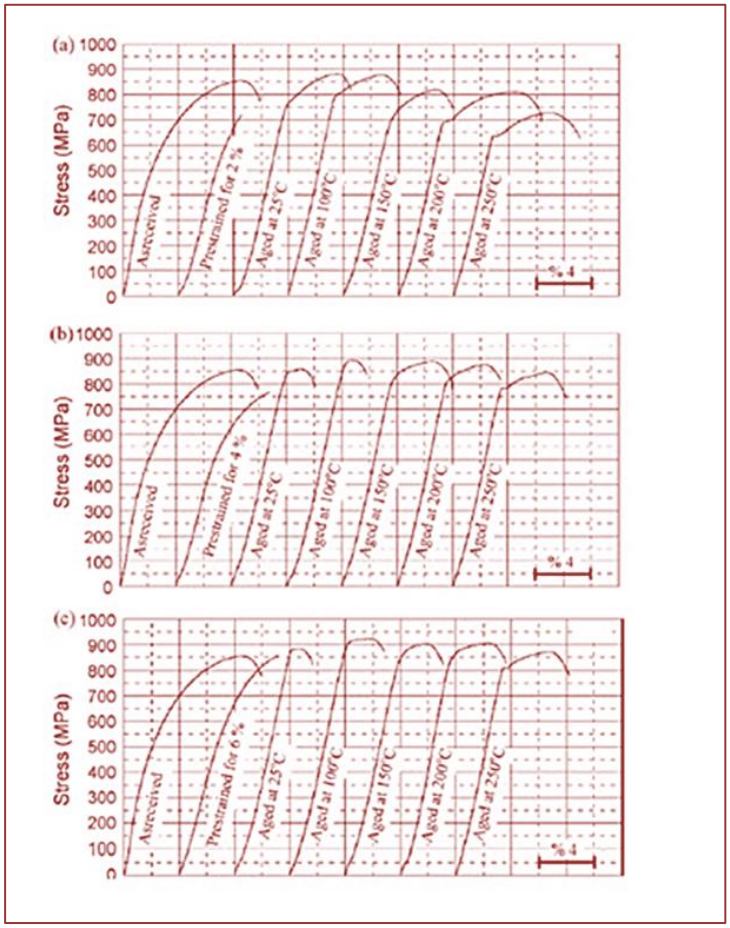
A tensão de escoamento (yield strength) representa um parâmetro fundamental na engenharia e ciência dos materiais, particularmente para materiais metálicos. Ela define o limite de tensão sob o qual um material se deforma elasticamente, retornando à sua forma original após a remoção da carga, e acima do qual ocorre a deformação plástica, que é permanente (ABDEWI, [2017]). Qualquer alteração não prevista nesta propriedade, seja induzida durante o processamento do material ou pelas condições a que ele é submetido em serviço, pode ter consequências significativas, potencialmente comprometendo a integridade e a segurança de componentes e estruturas (VAKILI et al., 2024) (Ver Figura 1).

Figura 1. Representação da influência do envelhecimento por deformação sobre a curva de tensão-deformação de um aço doce) (TOTAL MATÉRIA [2015]).



Nesse contexto, o fenômeno do envelhecimento por deformação (strain aging) assume particular relevância. Trata-se de um processo metalúrgico observado em diversas ligas metálicas, com destaque para os aços, que envolve a interação complexa entre defeitos na estrutura cristalina, conhecidos como discordâncias, e átomos de soluto, como carbono e nitrogênio, que ocupam posições intersticiais na rede atômica do metal (TOTAL MATÉRIA, 2013). Este fenômeno ocorre após o material ter sido submetido a uma deformação plástica e, subsequentemente, mantido em repouso ou submetido a um aquecimento moderado, como mostrado na Figura 2. Como resultado, ocorrem modificações significativas nas propriedades mecânicas do material, afetando notavelmente a tensão de escoamento, mas também a ductilidade, a tenacidade e o limite de resistência à tração (KUMAR; POVODEN-KARADENIZ, 2021).

Figura 2. Variação das curvas tensão-deformação de aço carbono de fase dupla a diferentes temperaturas de envelhecimento para três pré-deformações de 2% (a), 4% (b) e 6% (c). (TOTAL MATÉRIA, [2013]).



A compreensão aprofundada do envelhecimento por deformação é importante em múltiplos setores da engenharia. Na indústria automotiva, por exemplo, o controle deste fenômeno é explorado para otimizar a resistência de painéis estampados por meio do efeito Bake Hardening (MIHALIKOVÁ, 2019;TOTAL MATERIA, [2013]). Por outro lado, em equipamentos críticos como vasos de pressão, a ocorrência não controlada do envelhecimento pode levar a uma fragilização perigosa do material, aumentando o risco de falhas catastróficas, especialmente sob condições de impacto ou baixas temperaturas (GOMES, 1999; RENPU, 2011).

2. O FENÔMENO DO ENVELHECIMENTO POR DEFORMAÇÃO (STRAIN AGING)

O envelhecimento por deformação pode ser definido como um conjunto de alterações nas propriedades mecânicas de um metal ou liga, dependentes do tempo e da temperatura, que ocorrem após o material ter sido submetido a uma deformação plástica prévia. Essencialmente, trata-se de um mecanismo de endurecimento que se manifesta após a introdução de deformação plástica na microestrutura (KILIC et al., 2019).

Para que o fenômeno ocorra, algumas condições microestruturais são necessárias. Primeiramente, é preciso que haja discordâncias móveis na estrutura cristalina do metal

(TOTAL MATERIA, [2018]). Essas discordâncias são geralmente introduzidas ou multiplicadas durante a etapa de deformação plástica prévia (RIVERA-DIAZ-DEL-CASTILLO e HUANG, 2012). Em segundo lugar, deve haver uma concentração suficiente de átomos de soluto móveis na matriz metálica (TOTAL MATERIA, [2018]). Em aços, os solutos mais relevantes para o envelhecimento por deformação são os átomos intersticiais de carbono (C) e nitrogênio (N), devido ao seu pequeno tamanho e alta mobilidade na rede ferrítica, mesmo a temperaturas relativamente baixas (SAMEK et al., 2020).

O envelhecimento por deformação pode ser classificado com base nas condições em que ocorre:

- Envelhecimento Estático (Static Strain Aging - SSA): Este tipo de envelhecimento ocorre quando o material, após ser deformado plasticamente, é mantido em repouso à temperatura ambiente ou submetido a um tratamento térmico a temperaturas moderadas (por exemplo, entre 100°C e 250°C para aços) por um determinado período (TOTAL MATERIA, [2018]). Durante esse período de "descanso" ou aquecimento, os átomos de soluto intersticial possuem mobilidade suficiente para difundir através da rede cristalina e interagir com as discordâncias que foram geradas ou movidas durante a deformação prévia (TOTAL MATERIA, [2018]; MEZŐ, T. B., & BARKÓCZY, P. (2021)).
- Envelhecimento Dinâmico (Dynamic Strain Aging - DSA): Ao contrário do SSA, o envelhecimento dinâmico ocorre durante o processo de deformação plástica, dentro de uma faixa específica de temperatura e taxa de deformação (TOTAL MATERIA, [2018]). Nessas condições, os átomos de soluto são suficientemente móveis para difundir em direção às discordâncias enquanto estas estão se movendo ou quando são temporariamente detidas por obstáculos microestruturais (SANTOS, 2019; CHÁVEZ ET AL., 2020). Isso leva a interações repetidas de ancoragem das discordâncias pelos solutos e subsequente liberação sob tensão crescente (SANTOS, 2019). O DSA é frequentemente associado a instabilidades no escoamento plástico, manifestadas como serrilhados na curva tensão-deformação, um fenômeno conhecido como efeito Portevin-Le Chatelier (PLC) (SANTOS, 2019; CHÁVEZ ET AL., 2020).

A distinção entre SSA e DSA é fundamental do ponto de vista prático. O SSA afeta as propriedades mecânicas do material após a conclusão de um processo de conformação, influenciando a resistência e a tenacidade do componente final (TOTAL MATERIA, [2018]; RAABE ET AL., 2020). Por outro lado, o DSA influencia o comportamento do material durante a conformação, podendo afetar a própria formabilidade, causar variações na força de conformação e impactar o acabamento superficial da peça (SANTOS, 2019). Portanto, a previsão e o controle do DSA são vitais em processos de conformação realizados em temperaturas intermediárias, enquanto o SSA (ou suas variantes controladas, como o Bake Hardening) é relevante para determinar as propriedades mecânicas finais do componente manufaturado (TOTAL MATERIA, [2013]; RAABE ET AL., 2020).

Adicionalmente, o envelhecimento pode ser classificado quanto à temperatura em que ocorre:

- Envelhecimento Natural: Ocorre espontaneamente à temperatura ambiente ao longo do tempo, após a deformação plástica (NAVARRO, 2018). A cinética é mais lenta devido à menor mobilidade atômica (TOTAL MATERIA, [2018]).

- Envelhecimento Artificial: Envolve um tratamento térmico deliberado a temperaturas moderadas (acima da temperatura ambiente, mas abaixo das temperaturas de recristalização) para acelerar a difusão dos átomos de soluto e, consequentemente, os efeitos do envelhecimento (NAVARRO, 2018). O processo de Bake Hardening (BH), utilizado na indústria automotiva, é um exemplo proeminente de envelhecimento artificial controlado, onde o ciclo de cura da pintura fornece a energia térmica necessária para promover o envelhecimento (TOTAL MATERIA, [2013]; KILIC et al., 2019).

3. MECANISMOS MICROESTRUTURAIS

A compreensão do envelhecimento por deformação requer o entendimento dos mecanismos que ocorrem em nível microestrutural, envolvendo principalmente as discordâncias e os átomos de soluto.

A deformação plástica em materiais metálicos cristalinos ocorre predominantemente pelo movimento de defeitos lineares na rede cristalina, conhecidos como discordâncias. Quando uma tensão externa é aplicada, essas discordâncias se movem através dos planos de escorregamento, resultando na mudança de forma permanente do material. A facilidade com que as discordâncias se movem determina a tensão de escoamento do metal (ABDEWI, [2017]).

Átomos de soluto, especialmente os intersticiais como carbono e nitrogênio em aços ferríticos, possuem um tamanho que não se encaixa perfeitamente nos interstícios da rede cristalina do solvente (ferro). Isso cria um campo de deformação elástica ao redor do átomo de soluto. As discordâncias também possuem um campo de tensões associado a elas – por exemplo, uma discordância em aresta possui uma região de compressão acima do plano de escorregamento e uma região de tração abaixo dele. Existe uma interação energética favorável entre o campo de tensões da discordância e o campo de deformação do átomo de soluto. Especificamente, átomos intersticiais como C e N tendem a migrar para as regiões de tração da rede, como as localizadas abaixo do núcleo de uma discordância em aresta, pois isso alivia a distorção local da rede e minimiza a energia livre do sistema (MOTTAY ET AL., 2023).

Durante o processo de envelhecimento (seja estático ou dinâmico, natural ou artificial), os átomos de soluto, dotados de mobilidade térmica, difundem através da rede cristalina em direção às discordâncias que foram geradas ou rearranjadas pela deformação plástica prévia (ABDEWI, [2017]). Essa segregação preferencial de átomos de soluto nas vizinhanças das linhas de discordância leva à formação do que é conhecido como Atmosfera de Cottrell. Esta "atmosfera" ou "nuvem" de átomos de soluto envolve o núcleo da discordância.

A presença da atmosfera de Cottrell tem um efeito significativo na mobilidade da discordância. Ela exerce uma força de atração sobre a discordância, tornando mais difícil o seu movimento inicial. Para que a deformação plástica prossiga, uma tensão adicional deve ser aplicada para "arrancar" a discordância de sua atmosfera de solutos ou para forçar a discordância a se mover juntamente com a atmosfera (o que exigiria a difusão contínua dos solutos, um processo lento). Esse fenômeno é conhecido como ancoragem (pinning) das discordâncias (YU et al., 2024).

Essa sequência de eventos – geração de discordâncias pela deformação, difusão de solutos para as discordâncias durante o envelhecimento, formação da atmosfera de

Cottrell e consequente ancoragem das discordâncias – estabelece a ligação fundamental entre os eventos microestruturais e as alterações macroscópicas nas propriedades mecânicas observadas. A necessidade de uma tensão maior para iniciar o movimento das discordâncias ancoradas manifesta-se como um aumento na tensão de escoamento do material. Simultaneamente, a dificuldade aumentada para o movimento das discordâncias restringe a capacidade do material de acomodar a deformação plástica de maneira homogênea, o que frequentemente resulta em uma diminuição da sua ductilidade (WASEDA et al., 2017).

4. IMPACTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A interação entre discordâncias e átomos de soluto durante o envelhecimento por deformação resulta em alterações mensuráveis em diversas propriedades mecânicas do material (ABDEWI, [2017]).

4.1. TENSÃO DE ESCOAMENTO (YIELD STRENGTH)

O efeito mais proeminente e característico do envelhecimento por deformação em muitos metais, especialmente em aços, é o aumento da tensão de escoamento (σ_e) (ABDEWI, [2017]). Conforme explicado pelo mecanismo de ancoragem das discordâncias pela atmosfera de Cottrell, é necessária uma tensão aplicada significativamente maior para iniciar o movimento dessas discordâncias imobilizadas, em comparação com a tensão necessária para mover discordâncias "livres" em um material não envelhecido ou recozido.

Este aumento na tensão de escoamento está frequentemente associado ao Fenômeno do Ponto de Escoamento (Yield Point Phenomenon - YPP) (ABDEWI, [2017]). Materiais metálicos que passaram por envelhecimento por deformação, como aços de baixo carbono, frequentemente exibem um comportamento de escoamento descontínuo em ensaios de tração subsequentes. A curva tensão-deformação típica mostra:

- Um ponto de escoamento superior (σ_{es}): A tensão máxima necessária para liberar as discordâncias de suas atmosferas de Cottrell e iniciar o escoamento plástico (SANTOS, 2019).
- Uma queda abrupta na tensão: Após a liberação inicial, as discordâncias podem se mover sob uma tensão menor (SANTOS, 2019).
- Um ponto de escoamento inferior (σ_{ei}): Uma região de deformação plástica que ocorre a uma tensão aproximadamente constante (ou com pequenas oscilações), associada à propagação de uma ou mais frentes de deformação localizada conhecidas como Bandas de Lüders através do corpo de prova (ABDEWI, [2017]).
- Encruamento normal: Após a passagem das bandas de Lüders por toda a seção útil, o material começa a encruar de forma mais homogênea, e a tensão volta a subir com a deformação (SANTOS, 2019).

Um aspecto importante é que a deformação plástica inicial (antes do envelhecimento) geralmente elimina o fenômeno do ponto de escoamento, pois cria uma alta densidade de discordâncias livres (SANTOS, 2019). No entanto, o processo de envelhecimento subsequente permite que as atmosferas de Cottrell se reformem ao redor

dessas discordâncias, causando o reaparecimento do fenômeno do ponto de escoamento quando o material é novamente tracionado (GOMES, 1999).

Um exemplo prático e controlado deste aumento da tensão de escoamento é o efeito Bake Hardening (BH), explorado na indústria automotiva (TOTAL MATERIA, [2013]). Aços BH são projetados para terem uma baixa tensão de escoamento inicial, facilitando a estampagem de painéis complexos (TOTAL MATERIA, [2015]). Após a estampagem (que introduz a deformação plástica) e durante o ciclo de cura da pintura (tipicamente 170°C por 20 minutos, que atua como envelhecimento artificial), ocorre a formação de atmosferas de Cottrell (e possivelmente precipitação fina). Isso resulta em um aumento significativo e controlado da tensão de escoamento, geralmente na faixa de 30 a 90 MPa (TOTAL MATERIA, [2013]). O resultado é um componente final com maior resistência à indentação (por exemplo, por pequenas batidas ou granizo), sem comprometer excessivamente a conformabilidade inicial (TOTAL MATERIA, [2015]).

É importante notar, como destacado por Navarro (2018), que embora o aumento da tensão de escoamento via ancoragem por Cottrell seja o mecanismo dominante em aços e algumas outras ligas metálicas sujeitas ao envelhecimento por deformação clássico, o efeito geral do envelhecimento (que pode incluir envelhecimento térmico sem deformação prévia, ou ocorrer em outros tipos de materiais) sobre a σ_e pode ser mais complexo (NAVARRO, 2018). Navarro (2018) apresenta exemplos em polímeros e outras ligas onde a σ_e pode aumentar ou diminuir dependendo do material, da temperatura e do tempo de exposição, devido a mecanismos concorrentes como degradação, reticulação, coalescência de precipitados ou recuperação de defeitos (NAVARRO, 2018). No entanto, para o fenômeno específico do envelhecimento por deformação em metais onde a interação soluto-discordância é chave, o aumento da σe é a consequência predominante (ABDEWI, [2017]). Um estudo específico com o aço ASTM A516, comumente usado em vasos de pressão, demonstrou um expressivo aumento de 85% na tensão de escoamento após uma deformação de 10% seguida de envelhecimento, confirmando a potência deste mecanismo de endurecimento (ZILIO; TRINDADE, 2011).

A magnitude do aumento da tensão de escoamento depende de fatores como a quantidade de deformação plástica prévia (que influencia a densidade de discordâncias), a concentração de átomos de soluto intersticial livres (C e N), a temperatura e o tempo de envelhecimento (que controlam a cinética de difusão dos solutos) (ABDEWI, [2017]). Temperaturas ou tempos excessivos podem levar a uma diminuição da resistência devido a fenômenos de recuperação ou superenvelhecimento (coalescência de precipitados, se aplicável) (NAVARRO, 2018). Portanto, a relação entre envelhecimento e tensão de escoamento é dinâmica e dependente do contexto específico do material e do processo.

4.2. OUTRAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O envelhecimento por deformação não afeta apenas a tensão de escoamento; suas consequências se estendem a outras propriedades mecânicas importantes (ABDEWI, [2017]).

- Ductilidade: Uma das consequências mais comuns e frequentemente indesejáveis do envelhecimento por deformação é a redução da ductilidade. Medidas de ductilidade, como o alongamento percentual total na ruptura (%El) e a redução percentual de área (%RA), geralmente diminuem após o envelhecimento (ABDEWI, [2017]). A mesma ancoragem das discordâncias que eleva a tensão de

escoamento também restringe a capacidade do material de acomodar deformação plástica de maneira distribuída, favorecendo a localização da deformação e a fratura prematura. O envelhecimento dinâmico (DSA), em particular, pode levar a perdas severas de ductilidade devido às instabilidades de escoamento associadas ao efeito PLC (SANTOS, 2019).

- Tenacidade: A tenacidade, que representa a capacidade do material de absorver energia antes ou durante a propagação de uma trinca, é outra propriedade frequentemente degradada pelo envelhecimento por deformação (ZILIO; TRINDADE, 2011). O aumento da tensão de escoamento e a diminuição da ductilidade contribuem para um comportamento mais frágil (ZILIO; TRINDADE, 2011). Isso é particularmente crítico em aplicações estruturais sujeitas a carregamentos de impacto ou operando em baixas temperaturas (GOMES, 1999). O estudo já mencionado com aço ASTM A516 (ZILIO; TRINDADE, 2011) revelou uma queda dramática na energia absorvida em ensaios de impacto Charpy (de 207 J para 14 J a 0°C) após o envelhecimento, indicando uma severa fragilização e um aumento significativo na temperatura de transição dúctil-frágil (ZILIO; TRINDADE, 2011).
- Limite de Resistência à Tração (Tensile Strength): O limite de resistência à tração (σ_r), que corresponde à tensão máxima que o material suporta durante um ensaio de tração, pode apresentar um leve aumento (ABDEWI, [2017]) ou permanecer relativamente inalterado pelo envelhecimento por deformação. No caso do aço ASTM A516 envelhecido (ZILIO; TRINDADE, 2011), observou-se um aumento de 20% na σ_r. No entanto, é comum que a diferença entre σ_r e σ_{re} diminua após o envelhecimento, indicando uma menor capacidade de encruamento residual (ZILIO; TRINDADE, 2011).
- Dureza: A dureza, que mede a resistência do material à penetração ou risco superficial, geralmente aumenta com o envelhecimento por deformação, correlacionando-se com o aumento da tensão de escoamento e da resistência geral do material (TOTAL MATERIA, [2018]).

A tabela abaixo resume os efeitos típicos dos diferentes tipos de envelhecimento por deformação nas principais propriedades mecânicas de aços:

Tabela 1: Efeitos Típicos do Envelhecimento por Deformação em Propriedades Mecânicas de Aços

Propriedade Mecânica	Envelhecimento Estático (SSA)	Envelhecimento Dinâmico (DSA)	Bake Hardening (BH)
Tensão de Escoamento (sigma_e)	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2018])	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2018])	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2013])
Limite de Resistência (sigma_r)	Leve Aumento (↑) ou ~Constante (ABDEWI, [2017])	Aumento (↑) (ZILIO; TRINDADE, 2011)	Leve Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2013])
Ductilidade (%El, %RA)	Diminuição (↓) (ABDEWI, [2017])	Diminuição Severa (↓↓) (SANTOS, 2019)	Leve Diminuição (↓) (TOTAL MATERIA, [2013])
Tenacidade (Impacto, K_IC)	Diminuição (↓) (ZILIO; TRINDADE, 2011)	Diminuição Severa (↓↓) (ZILIO; TRINDADE, 2011)	Diminuição (↓) (TOTAL MATERIA, [2015])
Dureza	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2018])	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2018])	Aumento (↑) (TOTAL MATERIA, [2015])

Nota: A magnitude dos efeitos depende fortemente das condições específicas (material, temperatura, tempo, taxa de deformação) (TOTAL MATERIA, [2018]).

5. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS E APLICAÇÕES

A compreensão do fenômeno do envelhecimento por deformação e seus efeitos nas propriedades mecânicas tem implicações práticas significativas em diversas áreas da engenharia de materiais e processos:

- Processos de Fabricação: Muitos processos de fabricação de componentes metálicos envolvem etapas de conformação plástica (como estampagem, trefilação, laminação) seguidas, intencionalmente ou não, por períodos de repouso ou exposição a temperaturas elevadas (como em ciclos de pintura ou soldagem) (TOTAL MATERIA, [2013]). O envelhecimento por deformação (SSA ou BH) que ocorre nessas etapas subsequentes pode alterar as propriedades finais da peça, aumentando sua resistência, mas potencialmente reduzindo sua tenacidade (ABDEWI, [2017]). Além disso, se a conformação ocorrer em uma faixa de temperatura e taxa de deformação propícia ao DSA, a própria formabilidade do material pode ser comprometida, levando a defeitos superficiais ou dificuldades no controle do processo (SANTOS, 2019).
- Desempenho em Serviço e Integridade Estrutural: Em componentes que operam sob tensão e/ou a temperaturas elevadas por longos períodos, como vasos de pressão (GOMES, 1999), tubulações, pontes ou estruturas soldadas, o envelhecimento pode ocorrer em serviço (ZILIO; TRINDADE, 2011). Deformações plásticas localizadas (por exemplo, em entalhes ou zonas afetadas pelo calor da solda) podem ser seguidas por envelhecimento natural (à temperatura ambiente) ou acelerado (pela temperatura de operação). Isso pode levar a uma fragilização progressiva do material ao longo do tempo, aumentando o risco de falha súbita, especialmente sob carregamento dinâmico (impacto) ou em condições de baixa temperatura, onde a transição dúctil-frágil se torna crítica (GOMES, 1999). A avaliação da suscetibilidade ao envelhecimento é, portanto, um aspecto importante na análise de integridade e na definição da vida útil desses componentes (GOMES, 1999).

- Seleção de Materiais: O conhecimento sobre a suscetibilidade de diferentes ligas ao envelhecimento por deformação é importante para a seleção adequada do material para uma dada aplicação. Para componentes onde a alta tenacidade e a resistência à fratura frágil são primordiais (por exemplo, em aplicações criogênicas ou sujeitas a impacto), pode ser necessário selecionar materiais com baixa suscetibilidade ao envelhecimento (ZILIO; TRINDADE, 2011). Isso geralmente envolve o controle da composição química, especificamente a redução dos teores de carbono e nitrogênio intersticiais livres (ISPATGURU, 2014). Aços do tipo IF (Interstitial Free), onde C e N são estabilizados pela adição de elementos como Titânio ou Nióbio, são exemplos de materiais desenvolvidos para minimizar esses efeitos (ISPATGURU, 2014). Por outro lado, como já mencionado, o efeito BH é deliberadamente explorado na indústria automotiva, utilizando aços projetados especificamente para apresentar um aumento controlado da tensão de escoamento após a estampagem e a cura da pintura, visando melhorar a resistência à amassadura sem sacrificar a conformabilidade inicial (TOTAL MATERIA, [2013]).
- Tratamentos Térmicos: Tratamentos térmicos podem ser empregados tanto para mitigar os efeitos indesejáveis do envelhecimento quanto para induzir efeitos benéficos (TOTAL MATERIA, [2018]). Por exemplo, um tratamento de recozimento ou normalização após uma conformação severa pode ser usado para restaurar a ductilidade e a tenacidade perdidas devido ao envelhecimento (ZILIO; TRINDADE, 2011). Em contraste, ciclos térmicos controlados são aplicados para induzir o efeito BH nos aços apropriados (TOTAL MATERIA, [2015]).

A compreensão dos mecanismos microestruturais subjacentes ao envelhecimento por deformação permite uma abordagem de engenharia mais informada. Sabendo que a difusão de solutos intersticiais para as discordâncias é o evento chave, e que a cinética desse processo é fortemente dependente da temperatura e do tempo (TOTAL MATERIA, [2018]), os engenheiros podem intervir de várias maneiras. Podem selecionar ligas com teores controlados de solutos livres (ISPATGURU, 2014), projetar ciclos de processamento que evitem as condições críticas para o DSA ou que controlem o SSA/BH (SANTOS, 2019), ou aplicar tratamentos térmicos pós-conformação para otimizar o balanço final de propriedades (ZILIO; TRINDADE, 2011). Isso demonstra como o conhecimento fundamental da ciência dos materiais pode ser traduzido em soluções práticas para melhorar o desempenho, a confiabilidade e a eficiência na fabricação e utilização de materiais metálicos (ZILIO; TRINDADE, 2011).

6. CONCLUSÃO

O envelhecimento por deformação constitui um fenômeno metalúrgico de considerável importância, característico de diversas ligas metálicas, em particular dos aços. Sua origem reside na complexa interação, em nível microestrutural, entre as discordâncias introduzidas ou movidas durante a deformação plástica e os átomos de soluto intersticial, como carbono e nitrogênio, que se difundem e segregam para essas discordâncias durante um período subsequente de repouso ou aquecimento moderado. A formação da atmosfera de Cottrell ao redor das discordâncias resulta em sua ancoragem, dificultando seu movimento inicial.

A consequência macroscópica mais direta e marcante deste mecanismo de ancoragem é o aumento da tensão de escoamento do material. Este aumento é frequentemente acompanhado pelo reaparecimento do fenômeno do ponto de

escoamento e pela ocorrência de deformação localizada através das bandas de Lüders em ensaios de tração subsequentes. Embora benéfico em certas aplicações controladas como o Bake Hardening na indústria automotiva, onde se busca maior resistência final, o aumento da tensão de escoamento induzido pelo envelhecimento geralmente ocorre em detrimento de outras propriedades mecânicas fundamentais.

Observa-se, tipicamente, uma redução na ductilidade e, de forma mais crítica, uma diminuição na tenacidade à fratura do material. Essa fragilização pode comprometer a segurança e a confiabilidade de componentes estruturais, especialmente aqueles sujeitos a impactos, baixas temperaturas ou longos períodos de operação sob tensão e/ou temperatura elevada. A magnitude desses efeitos é sensível ao tipo específico de envelhecimento (estático, dinâmico, natural ou artificial), às condições de processo (temperatura, tempo, taxa de deformação) e às características intrínsecas do material (composição química, microestrutura inicial).

Portanto, a compreensão detalhada dos mecanismos e das consequências do envelhecimento por deformação é indispensável para a engenharia de materiais moderna. Ela informa decisões críticas relacionadas à seleção de materiais, ao projeto de processos de fabricação, à previsão do comportamento em serviço e à implementação de estratégias para mitigar riscos ou otimizar o desempenho. O fenômeno serve como um exemplo claro da intrincada relação entre a microestrutura, o histórico de processamento e as propriedades mecânicas finais dos materiais metálicos, destacando a necessidade de uma abordagem integrada entre ciência e engenharia para o desenvolvimento e aplicação segura e eficiente destes materiais

REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO, Rita Mota Morais de. Estudo do efeito Bake Hardening (BH) em aços baixo carbono por meio de ensaios de dureza e de tração. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC_2%C2%BA_2016-Rita-Mota-Morais-de-Ara%C3%BAjo-vers%C3%A3o-final.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025.

[2] CHÁVEZ, B.W.; GARCÉS, G.; PÉREZ, P.; BAREA, R.; ADEVA, P. “Dynamic Strain Aging (DSA) in solid solubilized Mg-Gd alloys under compression at intermediate temperatures”. Revista de Metalurgia, Madrid, v. 56, n. 3, p. e175, 2020. DOI: https://doi.org/10.3989/revmetalm.175.

[3] ELFETORI, F. Abdewi. Mechanical Properties of Reinforcing Steel Rods Produced by Zliten Steel Factory. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, [S. l.]: Elsevier, 2017. ISBN 9780128035818. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10362-5.

[4] GOMES, Paulo Tarso Vianna. Efeitos do envelhecimento térmico nas propriedades mecânicas do aço DIN 15Mo3. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Belo Horizonte, 1999. Disponível em: http://www.repositorio.cdtn.br:8080/bitstream/123456789/645/1/Dissertacao_PauloTarso_VGomes.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

[5] ISPATGURU. Interstitial Free Steels. [S. l.], 2014. Disponível em: https://www.ispatguru.com/interstitial-free-steels/. Acesso em: 15 abr. 2025.

[6] KILIC, Suleyman; SAHIN, Mevlut; OZTURK, Fahrettin; ERDEM, Oguz. Effects of Aging Temperature, Time, and Pre-Strain on Mechanical Properties of AA7075. Mat. Res., [S. l.], v. 22, n. 5, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0006.

[7] KUMAR, S.; POVODEN-KARADENIZ, E. Plastic Deformation Behavior in Steels during Metal Forming Processes: A Review. IntechOpen, 2021. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.97607.

[8] MEZŐ, T. B.; BARKÓCZY, P. Study on Static Strain Aging Kinetics of High-Carbon Steel Wires and Its Impact on High-Strength Steel Cords. Metals, Basel, v. 11, n. 11, p. 1684, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/met11111684.

[9] MIHALIKOVÁ, M.; ZGODAVOVÁ, K.; BOBER, P.; SÜTŐOVÁ, A. Prediction of Bake Hardening Behavior of Selected Advanced High Strength Automotive Steels and Hailstone Failure Discussion. Metals, Basel, v. 9, n. 9, p. 1016, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/met9091016.

[10] MOTTAY, W.; MAUGIS, P.; JOUIAD, M.; ROCH, F.; PERRIN-PELLEGRINO, C.; ET AL. Effect of dislocation density on competitive segregation of solute atoms to dislocations. Materials Science and Engineering: A, Lausanne, v. 883, p. 145380, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145380.

[11] NAVARRO, Rômulo Feitosa. Comportamento plástico e os efeitos do Envelhecimento sobre a tensão de escoamento. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 170-176, 2018. Disponível em: https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/download/681/458. Acesso em: 15 abr. 2025.

[12] RAABE, D.; SUN, B.; KWIATKOWSKI DA SILVA, A.; ET AL. Current Challenges and Opportunities in Microstructure-Related Properties of Advanced High-Strength Steels. Metallurgical and Materials Transactions A, [S. l.], v. 51, p. 5517–5586, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11661-020-05947-2.

[13] RENPU, Wan. Chapter 11 - Oil and Gas Well Corrosion and Corrosion Prevention. In: RENPU, Wan (Ed.). Advanced Well Completion Engineering. 3. ed. [S. l.]: Gulf Professional Publishing, 2011. p. 617-700. ISBN 9780123858689. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385868-9.00018-X.

[14] RIVERA-DIAZ-DEL-CASTILLO, Pedro; HUANG, M.X.. Dislocation annihilation in plastic deformation: I. Multiscale irreversible thermodynamics. Acta Materialia, [S. l.], v. 60, p. 2606-2614, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.01.027.

[15] SAMEK, L.; DYKAS, J.; DE MOOR, E.; GRAJCAR, A. Strain-Ageing of Low-Alloyed Multiphase High-Strength Steels. Metals, Basel, v. 10, n. 4, p. 439, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/met10040439.

[16] SANTOS, Aélcio de Jesus Monteiro dos. Análise do efeito do envelhecimento dinâmico por deformação (DSA) nas propriedades mecânicas do aço API 5L X80. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: https://ppgei.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2019/A%C3%89LCIO%20DE%20JESUS%20MONTEIRO%20DOS%20SANTOS.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025.

[17] TOTAL MATERIA. Strain ageing of steel 1. [S. l.], [2018]. Disponível em: https://www.totalmateria.com/en-us/articles/strain-ageing-of-steel-1/. Acesso em: 15 abr. 2025.

[18] TOTAL MATERIA. Strain ageing of steel 2. [S. l.], [20--]. Disponível em: https://www.totalmateria.com/en-us/articles/strain-ageing-of-steel-2/. Acesso em: 15 abr. 2025.

[19] TOTAL MATERIA. Ultra low carbon interstitial free steels. [S. l.], [20--]. Disponível em: https://www.totalmateria.com/en-us/articles/ultra-low-carbon-interstitial-free-steels/. Acesso em: 15 abr. 2025.

[20] VAKILI, M.; KOUTNÍK, P.; KOHOUT, J.; GHOLAMI, Z. Analysis, Assessment, and Mitigation of Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steels in the Oil and Gas Sector: A Review. Surfaces, Basel, v. 7, n. 3, p. 589-642, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/surfaces7030040.

[21] WASEDA, Osamu; VEIGA, Roberto; JULIEN, Morthomas; CHANTRENNE, Patrice; BECQUART, Charlotte; RIBEIRO, Fabienne; JELEA, Andrei; GOLDENSTEIN, Helio; PEREZ, Michel. Formation of carbon Cottrell atmospheres and their effect on the stress field around an edge dislocation. Scripta Materialia, [S. l.], v. 129, p. 16-19, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.09.032.

[22] YU, H.; DÍAZ, A.; LU, X.; SUN, B.; DING, Y.; KOYAMA, M.; HE, J.; ZHOU, X.; OUDRISS, A.; FEAUGAS, X.; ZHANG, Z. Hydrogen Embrittlement as a Conspicuous Material Challenge—Comprehensive Review and Future Directions. Chemical Reviews, Washington, v. 124, n. 10, p. 6271–6392, 2024. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00624.

[23] ZHAO, J. Z.; DE, A. K.; DE COOMAN, B. C. Formation of the Cottrell atmosphere during strain aging of bake-hardenable steels. [S. l.], [2001]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/226306766_Formation_of_the_Cottrell_atmosphere_during_strain_aging_of_bake-hardenable_steels. Acesso em: 15 abr. 2025.

[24] ZILIO, A. C.; TRINDADE, M. I. M. Análise da perda de tenacidade à fratura por difusão de intersticiais em aço ASTM A516 grau 60. Curitiba, 2011. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10303/3/CT_COEME_2011-2_06.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025.

CAPÍTULO

12 Propriedades reológicas incomuns de alguns biomateriais e materiais biológicos[1]

Resumo: Este capítulo aborda as propriedades reológicas de diversos biomateriais e materiais biológicos, destacando seus comportamentos incomuns e sua relevância para aplicações médicas e industriais. São discutidos géis poliméricos, hidrogéis de quitosana, suspensões de hidroxiapatita, cimentos ósseos à base de PMMA e o sangue humano. A influência da temperatura, taxa de deformação e composição desses materiais em suas propriedades reológicas é explorada, revelando comportamentos não newtonianos e tixotrópicos. A compreensão dessas propriedades é crucial para o desenvolvimento de biomateriais eficazes e para a melhoria de procedimentos médicos.

[1] Originalmente publicado em inglês sob referência Rômulo Feitosa Navarro, Unusual Rheological Properties of Some Biomaterials and Biologic Materials International Journal of Computational Engineering Research (IJCER), Volume, 13 || Issue, 4|| Jul.-Aug. – 2023, ISSN (e): 2250 – 3005.

1. INTRODUÇÃO

1.1. REOLOGIA DE SOLUÇÕES E GÉIS POLIMÉRICOS

As propriedades de soluções obtidas da associação de moléculas poliméricas de alto peso molecular com moléculas de solvente de baixo peso molecular são muito diferentes daquelas soluções que envolvem sólidos e líquidos de baixo peso molecular (TAGER, 1978). Quanto maior o peso molecular do polímero, maior a probabilidade de suas cadeias terem pontos de emaranhamento e ramificações. Assim, as propriedades reológicas e de fluxo de soluções poliméricas não são nada simples.

O efeito do peso molecular do polímero na viscosidade da solução depende do par polímero-solvente e é dado pela relação de lei de potência proposta por Mark, Houwink e Sakurada, a famosa equação MHS:

$$[\eta] = KM_V^a \qquad (1)$$

onde $[\eta]$ é a viscosidade intrínseca, Mv o peso molecular viscosimétrico, k e α constantes relacionadas ao par polímero-solvente.

A viscosidade das soluções poliméricas também depende da natureza do solvente. Se o solvente for bom, a viscosidade da solução será maior do que a viscosidade de uma solução formada com um solvente ruim na mesma concentração de polímero (NAVARRO, 1997). Embora as macromoléculas de polímero não interajam umas com as outras em soluções poliméricas muito diluídas, onde estão suficientemente afastadas umas das outras, tais macromoléculas isoladas podem ter diferentes conformações. Se a macromolécula for flexível, ela tem a conformação de um novelo aleatório, que incha em certa medida no solvente, dependendo da natureza do solvente e da temperatura. Quando a concentração dessas soluções aumenta, as moléculas de polímero de alto peso molecular começam a entrar em contato umas com as outras, formando assim associados. Um bom solvente não permite que esses associados inchem em grande extensão, e o tipo de contato mais provável é polímero-solvente e as macromoléculas permanecem lineares. A viscosidade da solução resultante será maior do que a das soluções quando o contato é polímero-polímero devido à má ação do solvente. Neste último caso, um novelo será formado em vez de moléculas estendidas. Assim, a viscosidade da solução será menor (TAGER, 1978; NAVARRO, 1997).

Em geral, géis poliméricos obtidos de soluções ocorrem como resultado do inchamento de uma molécula polimérica linear, ramificada ou tridimensional contra um solvente de baixo peso molecular. Existem dois tipos de géis. Os géis do tipo 1 são sistemas polímero-líquido de baixo peso molecular nos quais a rede é formada por ligações químicas entre moléculas. As ligações não são destruídas no aquecimento, e tais géis não derretem em nenhuma temperatura. Quando tais géis são aquecidos a uma temperatura superior a uma crítica, todo o sistema é destruído termicamente de forma irreversível. Portanto, tais géis são chamados de termicamente irreversíveis. Os géis do tipo 2 são sistemas nos quais a rede é formada por ligações intermoleculares de natureza diferente. Essas ligações são estáveis sob certas condições, mas podem romper quando as condições, como temperatura e o tipo de líquido de baixo peso molecular, por exemplo, mudam. Nesse caso, uma solução verdadeira homogênea é formada e os géis são termicamente recuperáveis (TAGER, 1978).

Géis poliméricos são redes poliméricas reticuladas inchadas com um solvente, ou seja, são géis do tipo 1. Em termos reológicos, os géis poliméricos se comportam como sólidos e líquidos, dependendo da taxa de deformação, frequência e faixa de temperatura (NAVARRO, 2018) e do inchamento de equilíbrio em um determinado solvente (NAVARRO, 1997).

Hidrogéis são estruturas poliméricas reticuladas inchadas em água com ligações covalentes da reação de um ou mais co-monômeros, ligações cruzadas físicas de emaranhados de cadeia, e ligações de hidrogênio e interações de van der Waals entre cadeias ou cristalitos combinando cadeias macromoleculares (DUAN; KANDEMIR; WANG; CHEN, 2017).

1.2. HIDROGÉIS DE QUITOSANA BASEADOS EM CERTOS ÁCIDOS HIDROXÍLICOS

Hidrogéis de quitosana são obtidos pela interação de quitosana com pequenas moléculas de ácido. Tal combinação não favorece a solubilidade da quitosana, mas é positiva em termos de aplicações médicas devido à sua atividade biológica e baixa toxicidade.

Como esperado, hidrogéis de quitosana feitos com ácido mandélico são caracterizados por valores de viscosidade mais altos, em comparação com hidrogéis contendo ácido lactobiônico devido à maior atividade do ácido mandélico nas moléculas de quitosana.

Apesar do comportamento misto líquido-sólido apresentado pelos géis, ou seja, eles são viscoelásticos, normalmente os géis, quando em faixas de cisalhamento adequadas que permitem o fluxo viscoso, se apresentam como fluidos newtonianos ou muito raramente como fluidos pseudoplásticos sem qualquer "estrutura" interna que os impeça de fluir nessas condições de cisalhamento. Assim, géis poliméricos na faixa fluida podem ser descritos por relações simples como:

$$\tau=\mu\gamma \qquad (2)$$

se apresentarem comportamento newtoniano, ou:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \qquad (3)$$

Para os pseudoplásticos, onde τ é a tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação; μ a viscosidade, k o índice de consistência e n o índice da lei de potência.

Zavyalova et al. (2021) obtiveram soluções de quitosana dissolvendo quitosana de baixo peso molecular em soluções de ácido lactobiônico e ácido mandélico. Os géis foram formados a partir de diferentes mecanismos. Medidas de viscosidade dinâmica ($\eta = \tau / \dot{\gamma}$) ($\eta$ é a viscosidade aparente para fluidos não newtonianos) versus taxa de deformação foram feitas. Todos os hidrogéis obtidos têm alta viscosidade e essas viscosidades aumentam com o tempo em repouso.

Em geral, quando géis pseudoplásticos, por algum processo, têm o valor inicial da viscosidade dinâmica aumentado, sua sensibilidade ao cisalhamento também é aumentada, ou seja, eles se tornam mais pseudoplásticos e mais instáveis (veja a Figura 1). Para fluidos pseudoplásticos, $0 < n < 1$. A sensibilidade ao cisalhamento aumenta à

medida que $n \rightarrow 0$. Assim, sua viscosidade aparente diminui com a taxa de deformação mais rapidamente em direção ao valor de equilíbrio newtoniano.

Géis de quitosana em uma mistura de ácidos acético e maleico se comportam como mostrado na Figura 1. A viscosidade de cisalhamento zero, $\eta 0$, do gel aumenta com o teor de quitosana, mas a viscosidade aparente diminui mais rapidamente na região pseudoplástica. Na Figura 2, é mostrada a variação da taxa de deformação zero e da viscosidade relativa, $\bar{\eta}$, aparente de equilíbrio final, $\eta\infty$, (veja a Eq. 4) com o teor de quitosana. À medida que os géis se tornam mais pseudoplásticos, essa diferença relativa tende a se aproximar da unidade.

$$\bar{\eta} = \frac{\eta(t) - \eta\infty}{\eta 0} \qquad (4)$$

Todos os géis de quitosana usados por Zavyalova et al. (2021) exibiram comportamento pseudoplástico, mas o aumento da sensibilidade ao cisalhamento não foi observado, então as curvas superiores são apenas paralelas às inferiores (veja a Figura 3).

Com base nos espectros de FTIR, foi comprovado que tanto os grupos carboxila quanto os hidroxila estavam envolvidos na interação entre a quitosana e as moléculas dos ácidos hidroxílicos mencionados anteriormente. A viscosidade aumentou ao longo do tempo de repouso devido ao processo progressivo de protonização dos grupos amino resultante da dissociação progressiva dos ácidos hidroxílicos e do número crescente de ligações entre a quitosana e os ácidos hidroxílicos (ZAVYALOVA; GAJEWSKA; DĄBROWSKA-WISŁOCKA; SIONKOWSKA, 2021).

Figura 1. Curvas reológicas usuais para géis pseudoplásticos.

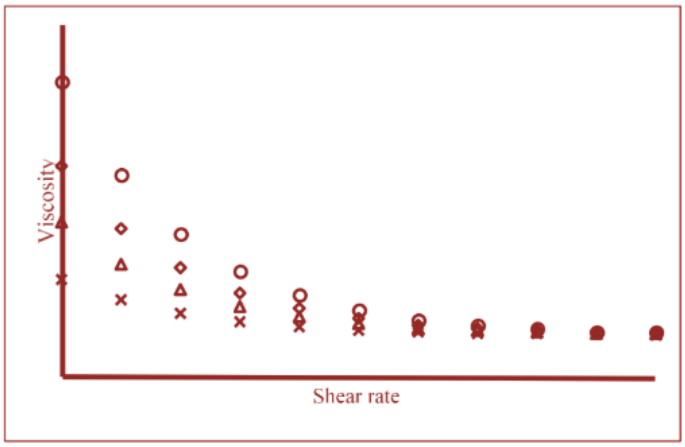


Figura 2. Caráter pseudoplástico de géis de quitosana em função do teor de quitosana. (Fonte: Laboratório de Reologia da Certbio).

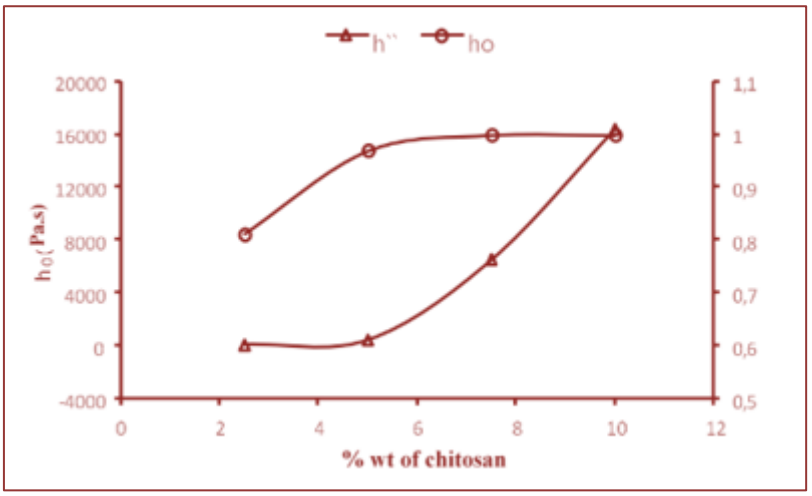
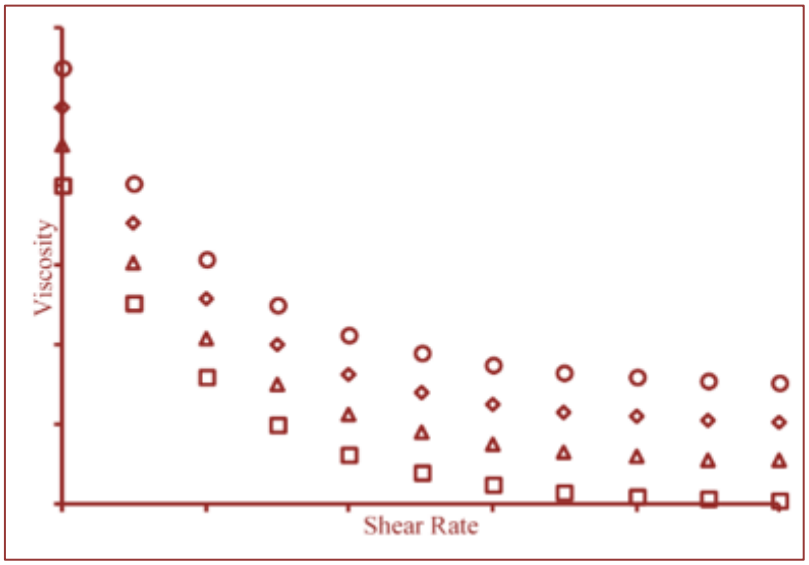


Figura 3. Curvas reológicas de hidrogéis de quitosana com certos ácidos hidroxílicos com diferentes tempos de repouso (adaptado de Zavyalova et al., 2021).



A utilidade da combinação da quitosana, que possui propriedades únicas, com ácidos hidroxílicos bioativos para aplicação médica é ainda melhor com as propriedades reológicas mostradas pelos géis obtidos. A estabilidade da taxa de deformação em qualquer viscosidade dinâmica permite a aplicação sem a necessidade de alterar o equipamento usado com outros hidrogéis à base de quitosana e que o gel injetado, por exemplo, estará no ponto de aplicação desejado.

1.3. REOLOGIA DE SUSPENSÕES

Muitos fluidos industriais, farmacêuticos e biológicos importantes são suspensões que têm um fluido como meio de dispersão e partículas sólidas como fase dispersa. Uma vez que um sólido pode ser considerado um fluido com viscosidade infinita, a viscosidade da suspensão é muito dependente do conteúdo sólido e, mesmo com conteúdo

infinitesimal de sólidos, quase todas as suspensões mostram comportamento não newtoniano. O modelo mais simples para uma suspensão é o sistema idealizado por Einstein. Neste sistema, partículas sólidas esféricas e rígidas são dispersas em um fluido newtoniano, formando uma suspensão muito diluída onde a fração volumétrica de partículas sólidas, ϕ, tende a zero. Assume-se que não há contato entre as partículas. Assim, o movimento de uma partícula não depende do movimento de outra partícula. Para este modelo idealizado, a viscosidade da suspensão, η, é dada por:

$$\eta_S = \eta_o(1 + 2{,}5\phi) \qquad (5)$$

onde η_0 é a viscosidade do meio de dispersão.

Assim, quanto maior a concentração de sólidos, maior a viscosidade da suspensão de forma monotônica e linear. Mas à medida que a concentração de sólidos aumenta, a probabilidade de surgir contato entre as partículas também aumenta. Assim, o modelo de Einstein raramente é útil para a maioria das suspensões existentes e há a necessidade de determinar o ponto crítico para o conteúdo sólido a partir do qual a suspensão não pode ser considerada diluída e se torna concentrada. Nesta concentração crítica, o movimento hidrodinâmico das partículas suspensas é muito dependente um do outro e frequentemente aglomerados de partículas são formados. Como resultado, a viscosidade da suspensão aumenta dramaticamente. Acima da concentração crítica, vários comportamentos não newtonianos surgem e algumas suspensões não fluem como um líquido simples e algumas se comportam como um sólido no caso limite. Portanto, deve-se estabelecer o conteúdo máximo de partículas suspensas para que a suspensão ainda seja considerada um fluido.

Vinogradov & Malkin (1980) propuseram que esta concentração máxima deveria ser dada por:

$$\Phi\mathrm{m} = \frac{2{,}5\phi}{1-\frac{\phi}{\varphi}} \qquad (6)$$

onde Φm é a concentração máxima e φ é o fator de empacotamento do aglomerado de partículas com valores entre 0,5 e 0,7 e (NAVARRO, 1997).

É óbvio que Φm e φ também dependem da forma das partículas. Partículas não esféricas formarão aglomerados mais facilmente do que as esféricas e seu movimento hidrodinâmico também será mais difícil. Portanto, para uma suspensão de partículas em forma de bastonete, Φm é menor do que para as esféricas, por exemplo.

Na literatura (NAVARRO, 1997), podem-se encontrar muitas outras equações que usam o conceito de conteúdo máximo de partículas.

2. PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO À BASE DE PMMA

Entre várias propriedades reológicas, suspensões poliméricas à base de partículas esféricas em pó dispersas nos polímeros curáveis têm uma viscosidade complexa que surge com o tempo.

Em sistemas contendo PMMA, na fase inicial de mistura do cimento (esferas de PMMA + pó de partículas), há um aumento da viscosidade do sistema. Este aumento se deve ao inchamento das esferas de PMMA no pó de cimento. Como resultado, à medida que o tempo de mistura aumenta, a fração de empacotamento máxima do pó de partículas e a viscosidade intrínseca do meio fluido diminuem.

A propósito, a segunda tendência mostra algo incomum (LEWIS; CARROLL, 2002). A viscosidade complexa medida deste sistema é extremamente superior àquelas esperadas para sistemas semelhantes.

Como preconizado na literatura, existe uma relação inversa entre a temperatura máxima de cura do cimento e o diâmetro médio geral das esferas da matriz polimérica. Assim, esperava-se que o sistema PMMA + pó com partículas de baixo diâmetro tivesse alto temperatura de cura, mas baixo valor para o tempo no início da cura do cimento. Este foi um problema muito importante durante o procedimento de implante ósseo.

Por que o problema mencionado acima ocorre? Durante o procedimento de cura, as pequenas esferas poliméricas são completamente dissolvidas pelo monômero líquido que ainda não está polimerizado e as maiores sobrevivem por muito tempo no processo de mistura. Deste ponto de vista, quanto maior a proporção de esferas da matriz polimérica de pequeno diâmetro ($0 < d < 40\mu m$) no pó, maior a temperatura de cura do cimento, e quanto maior a proporção de esferas da matriz polimérica de grande diâmetro ($d > 75\ mm$), maior o valor desta temperatura.

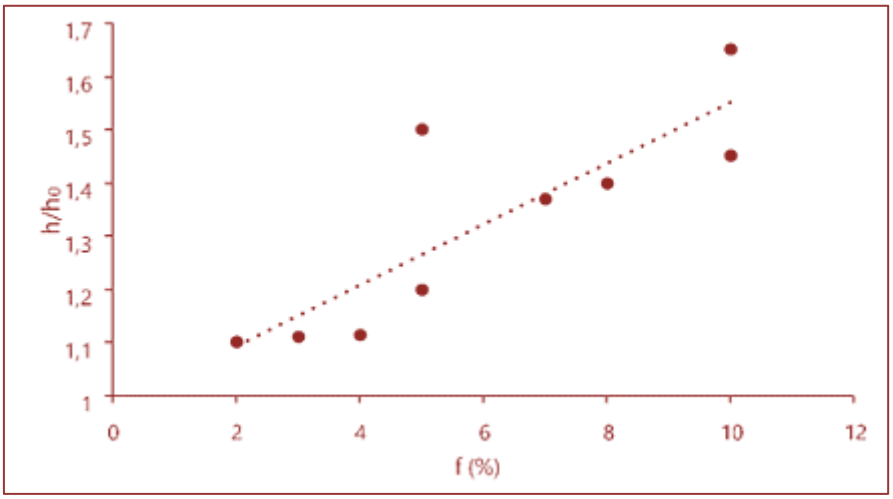
Como os resultados obtidos por Lewis e Carroll (2002) são estatisticamente muito significativos, pode-se entender que as propriedades reológicas de um cimento durante a cura devem ser baseadas no diâmetro real das partículas, e não como foram feitas pelo diâmetro médio.

Portanto, deve-se desenvolver um método correto para manipular a distribuição do tamanho das partículas do pó de cimento, a fim de obter o comportamento reológico ideal da massa polimérica, incluindo a temperatura máxima de cura e a viscosidade complexa.

3. REOLOGIA DO SANGUE

Fluidos comuns e sólidos elásticos obedecem a leis universais, nomeadamente as leis de Navier-Stokes e Hooke-Lamé. Em contrapartida, fluidos complexos ainda continuam a escapar de uma descrição universal (se é que existe alguma). Fluidos complexos são onipresentes na natureza.

Figura 4. Viscosidade (relativa à viscosidade do solvente) vs. fração de volume para suspensões de glóbulos vermelhos em tampão salino fosfato. (adaptado de Vitkova et al., 2020)



O sangue normal é um exemplo proeminente de um fluido complexo e consiste em partículas altamente deformáveis (glóbulos vermelhos (RBC) ou eritrócitos), glóbulos brancos (leucócitos) e plaquetas suspensas em solução aquosa newtoniana de proteínas e sais (plasma). Como os outros constituintes particulados do sangue (glóbulos brancos e plaquetas) geralmente ocupam apenas menos de 1% do volume total das células sanguíneas no sangue humano normal, os RBCs governam as propriedades de fluxo do sangue. Livremente suspensa, sem tensão externa, uma célula vermelha humana madura normalmente assume a forma de um disco "bicôncavo", com cerca de 8 μm de diâmetro e 2 μm de espessura, com uma concavidade em cada face. Não tem núcleo e seu interior é preenchido com uma solução concentrada de hemoglobina, um fluido viscoso incompressível. É cercado por uma membrana viscoelástica flexível, que consiste em uma bicamada lipídica e um citoesqueleto (uma rede de moléculas de proteína adjacente e projetando-se através da bicamada) (SECOMB, 1992). No sangue, os RBCs se movem e se deformam em escalas de tempo durante o fluxo, portanto, a lei constitutiva macroscópica deve conter informações sobre a dinâmica das entidades suspensas, mesmo que a lei seja uma média.

3.1. SANGUE NO FLUXO CAPILAR

Vitkova et al. (2020) estudaram várias suspensões de glóbulos vermelhos e não observaram uma relação não linear entre a viscosidade relativa da suspensão e as células sanguíneas para concentrações de até 10% (veja a Figura 4), o que é um resultado inesperado, pois a suspensão se comportou como uma de partículas esféricas rígidas, embora os glóbulos vermelhos não sejam esféricos, mas elípticos. O comportamento esperado é semelhante ao mostrado na Figura 2). Isso ocorre porque as partículas se orientam de forma constante e paralela à direção do fluxo, como uma suspensão de vesículas. Assim, seu efeito hidrodinâmico não é tão alto quanto o esperado para partículas elípticas comuns suspensas em um fluido newtoniano. A reologia da suspensão de RBC pode ser descrita pela teoria das vesículas, mesmo sendo um objeto mais simples, que parece capturar a essência da dinâmica dos RBC sob fluxo, no que diz respeito à reologia. Por outro lado, em Vitkova et al. (2020), pode-se observar que distúrbios

sanguíneos afetam fortemente a deformabilidade dos eritrócitos, bem como sua dinâmica na corrente sanguínea, levando, em alguns casos, a consequências fisiológicas dramáticas para o organismo. Sabe-se que algumas doenças (ex. anemia) e comportamentos sociais (ex. alcoolismo crônico) modificam o comportamento mecânico e reológico do sangue. Como as medições reológicas são sensíveis às propriedades físicas das células, elas podem ser usadas para capturar desvios patológicos na forma, no volume reduzido e/ou na rigidez das células por meio de tal ensaio macroscópico da reologia da suspensão.

Como visto anteriormente, os RBCs são partículas não esféricas e deformáveis que fluem em veias, artérias e capilares. Os capilares são os vasos sanguíneos menores e mais numerosos do sistema circulatório, com diâmetros variando de cerca de 3 μm a 10 μm em mamíferos. Como o diâmetro de um RBC livremente suspenso excede o diâmetro de muitos capilares, as células vermelhas devem sofrer grandes deformações para passar pelos capilares. No entanto, as células vermelhas passam por capilares muito pequenos com relativa facilidade, como resultado da natureza fluida de seus interiores e da flexibilidade de suas membranas (SECOMB, 1992).

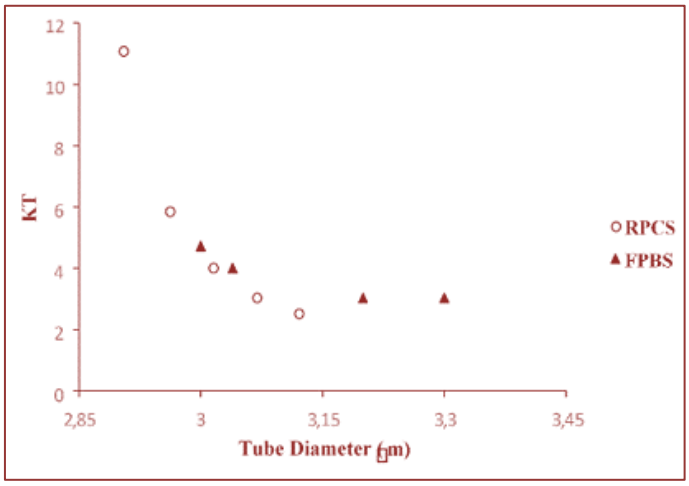
As formas de glóbulos vermelhos observadas em capilares geralmente não são axissimétricas. Surge a questão de saber se os desvios da axissimetria afetam significativamente os parâmetros reológicos, como a viscosidade aparente dada pela Eq. 7 (veja a Figura 5). Se a célula não for simétrica, forças fluidas externas assimétricas são geradas. Como a célula tem um interior fluido e uma membrana flexível, essas forças podem impulsionar um movimento contínuo da membrana ao redor da célula. Esse fenômeno, conhecido como "tank treading" (movimento de esteira), foi observado em tubos capilares (GAEHTGENS, 1981; GAEHTGENS; SCHMID-SCHÖNBEIN, 1982).

$$\eta = \eta o(1 + K_\tau H_\tau) \qquad (7)$$

onde K_τ é a viscosidade intrínseca aparente do sangue em tubos cilíndricos com diâmetros quase mínimos, H_τ é o hematócrito local do tubo em capilares.

Em capilares, os glóbulos vermelhos frequentemente fluem em fila única, particularmente se o diâmetro for de cerca de 6 μm ou menos. Nesses casos, é razoável negligenciar as interações entre os glóbulos vermelhos e obter estimativas dos parâmetros reológicos analisando o movimento e a deformação de um glóbulo vermelho individual e do plasma circundante em um capilar. Em uma excelente revisão, Secomb (1992) apresenta várias razões para esse comportamento notável dos RBCs.

Figura 5. K_τ em função do diâmetro do tubo. A velocidade da célula é de 0,01 cm/s. (RPCS = partícula rígida com forma crítica, e FPBS = partícula flexível com flexão e cisalhamento) Adaptado de Secomb (1992)).



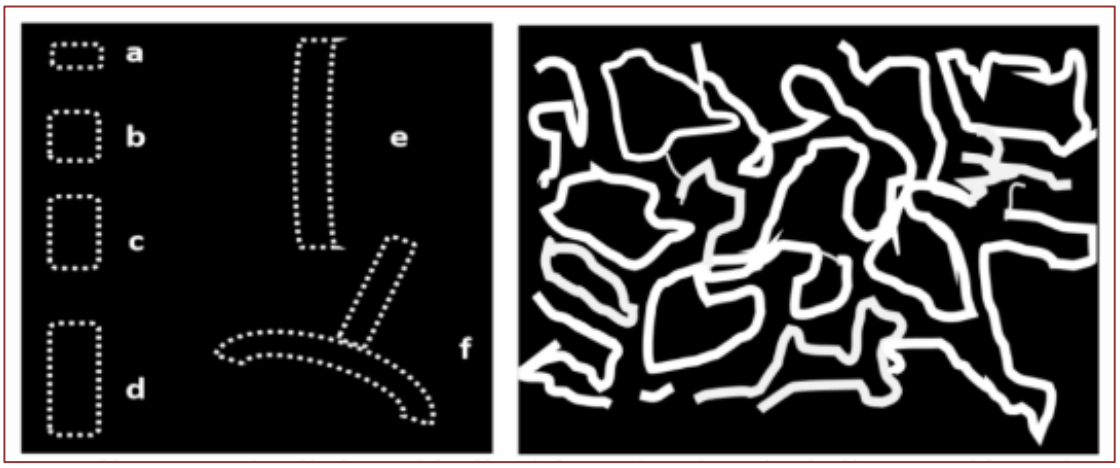
Para o fluxo em fila única de glóbulos vermelhos, modelos axissimétricos usando a teoria da lubrificação fornecem previsões da viscosidade aparente do sangue que estão em concordância razoável com os dados experimentais disponíveis de medições feitas em tubos de vidro com diâmetros apropriados. Exceto em velocidades de fluxo muito baixas, a viscosidade aparente do sangue em capilares é substancialmente menor do que a viscosidade em massa do sangue. As formas observadas dos glóbulos vermelhos não são axissimétricas, e a assimetria celular resulta em um movimento do tipo movimentação por esteira ("*tank treading*") da membrana celular ao redor da célula. No entanto, a assimetria celular e o "*tank treading*" têm pouca influência na viscosidade aparente no fluxo em fila única e no fluxo em fila dupla tipo zíper. Assim, uma vez que um glóbulo vermelho entra em um capilar, sua capacidade de se deformar continuamente no movimento de "*tank treading*" parece ser de importância secundária. No entanto, a deformabilidade dos glóbulos vermelhos é, obviamente, essencial para permitir que as células entrem em capilares de 8 μm ou menos de diâmetro em primeiro lugar. Além disso, as células devem ser deformáveis para negociar as mudanças de diâmetro e outras irregularidades que encontram enquanto se movem ao longo de capilares reais *in vivo* (SECOMB, 1992).

3.2. FLUXO SANGUÍNEO EM GRANDES ARTÉRIAS

O fluxo sanguíneo arterial é mais complexo do que o capilar. O fluxo sanguíneo arterial no corpo humano é tipicamente um fluxo pulsátil não newtoniano multifásico em um duto elástico cônico com a extremidade terminal e/ou pequenos ramos. O fluxo pulsátil é um fluxo instável no qual o fluxo resultante é composto por uma média e um componente dependente do tempo que varia periodicamente. O fluxo pulsátil é responsável pelo efeito submissivo nos comportamentos viscoelástico e tixotrópico dependentes do tempo para o sangue (YILMAZ; GUNDOGDU, 2008). A natureza agregável e deformável dos glóbulos vermelhos desempenha papéis significativos na reologia do sangue. A agregação de glóbulos vermelhos causa um grande aumento na viscosidade em baixas taxas de cisalhamento. O tamanho da agregação de glóbulos vermelhos é uma função da concentração de glóbulos vermelhos e da taxa de deformação (ZYDNEY;

OLIVER; COLTON, 1991. A existência de agregação também depende da presença de proteínas fibrinogênio e globulina no plasma (FUNG, 1993). Quando a taxa de deformação tende a zero, os glóbulos vermelhos se tornam um grande agregado, que então se comporta como um sólido. À medida que a taxa de deformação aumenta, os agregados de glóbulos vermelhos tendem a se quebrar e a estrutura se torna uma suspensão de um aglomerado de agregados de glóbulos vermelhos no plasma. Esses agregados são, por sua vez, formados por unidades menores chamadas Rouleaux[2], como mostrado na Figura 6. À medida que a taxa de deformação aumenta mais, o número médio de glóbulos vermelhos em cada Rouleaux diminui. Se a taxa de deformação for maior que um certo valor crítico, os Rouleaux são quebrados em células individuais. Em taxas de cisalhamento subcríticas, os glóbulos vermelhos em cada rouleaux mantêm sua forma de equilíbrio de repouso, forma discoide bicôncava. Se a taxa de deformação for supercrítica, os glóbulos vermelhos são dispersos no plasma separadamente e tendem a se alongar e se alinhar com as linhas de corrente (KANG, 2002).

Figura 6. Rouleaux de glóbulos vermelhos humanos em uma forma idealizada mostrando agregados lineares e ramificados únicos (parte esquerda) e uma rede (parte direita). O número de células em matriz linear é 2, 4, 9, 15 e 36 em a, b, c, d, f, respectivamente. Adaptado de Fung (1993).



Os estudos relacionados com os comportamentos dos glóbulos vermelhos na microcirculação, no sistema venoso e no geral mostraram que os mecanismos de agregação dos glóbulos vermelhos são determinados pelo equilíbrio das forças de agregação e desagregação. As forças de desagregação consistem principalmente em força de cisalhamento mecânica, força repulsiva e energia elástica da membrana dos glóbulos vermelhos. No entanto, o mecanismo da força de agregação não é claro. Como mencionado em Baumler et al. (1999), a ponte, devido à adsorção de macromoléculas em superfícies celulares adjacentes, e a depleção, devido ao gradiente osmótico resultante da exclusão de macromoléculas perto da superfície celular, são modelos moleculares atualmente usados para descrever comportamentos de agregação (YILMAZ; GUNDOGDU, 2008).

[2] Unidades Rouleaux, ou formação em Rouleaux, é o empilhamento das hemácias, onde elas se dispõem em fileiras, lembrando uma pilha de moedas.

Pode-se facilmente entender, a partir dos estudos direcionados à estrutura do sangue, que a viscosidade do sangue depende das condições fisiológicas de fluxo do sangue e das propriedades da composição do sangue, como hematócrito, temperatura, taxa de deformação, agregação celular, forma celular, deformação celular e orientação celular. Em uma revisão crítica e abrangente, Yamaz & Gundogdu (2008) apresentam vários modelos de viscosidade relacionados à viscosidade do sangue, 28 para viscosidade relativa com base na dependência da concentração de dispersões e 13 modelos de viscosidade não newtonianos independentes do tempo. Infelizmente, nenhum desses modelos funciona com a eficácia desejada, uma vez que os efeitos da agregação celular, forma celular, deformação celular e orientação celular não foram claramente refletidos nesses modelos, embora esses modelos considerem os efeitos do hematócrito ou concentração celular, taxa de deformação e temperatura. No entanto, estudos numéricos sobre os comportamentos dos glóbulos vermelhos dão esperança para a transferência do conhecimento disponível sobre comportamentos hemodinâmicos e hemorreológicos microscópicos para um modelo de viscosidade do sangue. Apesar de haver um grande número de estudos sobre modelos de viscosidade do sangue newtonianos e não newtonianos na literatura, houve uma variação no valor crítico da taxa de deformação limitante usada para abordar a transição do caráter de viscosidade não newtoniano para o newtoniano do sangue. A dependência do hematócrito desse valor de taxa de deformação limitante deve ser investigada para avaliar a aplicação adequada de modelos de viscosidade não newtonianos e newtonianos em estudos sobre o fluxo sanguíneo.

4. EFEITO DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE

A viscosidade, μ, dos materiais é marcadamente afetada pelos efeitos da variação de temperatura e pode variar em até 10% para uma simples variação de 1°C na temperatura. Enquanto os gases de baixa densidade aumentam a viscosidade com o aumento da temperatura, a viscosidade da maioria dos líquidos diminui exponencialmente com o aumento da temperatura. Para este tipo de fluido, a maneira mais comum de representar a dependência μ(T) é através de uma equação do tipo Arrhenius, conforme proposto por Eyring para fluidos newtonianos (NAVARRO, 1997):

$$\mu(T) = ae^{\left(\bar{E}/RT\right)} \qquad (8)$$

onde μ é a viscosidade newtoniana ou absoluta, R é a constante dos gases, T é a temperatura em K, $\bar{E}$ é a energia de ativação do fluxo viscoso e A é uma constante.

4.1. ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO FLUXO VISCOSO

A energia $\bar{E}$ indica que existe uma barreira a ser superada para que o fluxo viscoso ocorra. Assim, constitui a principal quantidade a ser determinada para a medição de μ(T). O modelo WLF, conhecido como a equação de Williams,Landel & Ferry, assume um valor constante para $\bar{E}$ para qualquer fluido em altas temperaturas. Para polímeros nessas temperaturas, no entanto, $\bar{E}$ assume valores diferentes para cada polímero em consideração e depende fortemente da composição da cadeia polimérica e de suas ramificações (WANG; PORTER,1993).Quanto aos grupos laterais ou ramos, $\bar{E}$ pode crescer marcadamente com o volume molar dos pequenos ramos ligados à cadeia principal, a materiais de baixo peso molecular, $\bar{E}$ aumenta com sua temperatura de fusão,

Tm, devido às inter-relações moleculares que dificultam o movimento relativo das camadas de fluido. No entanto, para algumas poliolefinas,($\bar{E}$)pode diminuir com o aumento de Tm. Devido aos vários comportamentos controversos na relação $\bar{E}$(T), outras teorias começaram a ser desenvolvidas para configurar melhor a dependência μ(T) (NAVARRO, 1997).

4.2. A EQUAÇÃO WLF

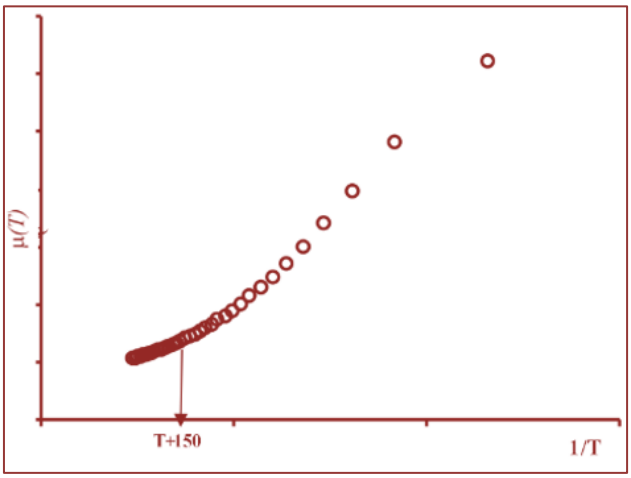
Alguns polímeros tornam-se instáveis entre $T > Tg + 100°C$. Neste caso, a teoria de Wang & Porter não pode ser usada, e equações como a WLF (Eq. 9), que se baseia na teoria do volume livre, são mais recomendadas.

$$\log \frac{\mu(T)}{\mu(T_R)} = \log a_T = \frac{-C_1(T-T_R)}{C_2+(T-T_R)} \qquad (9)$$

onde C_1 e C_2 são constantes, T_R uma temperatura de referência e a_T um coeficiente chamado fator de deslocamento.

De acordo com Ferry (1980), se T_g for tomado como a temperatura de referência, as constantes C_1 e C_2 assumem valores universais iguais a -17,44 e 51,6, respectivamente. Alguns polímeros têm valores diferentes destes, de modo que a Equação 9 pode ser usada com segurança para calcular a dependência μ(T), especialmente aqueles cuja forma gráfica é mostrada na Figura 7. Em geral, os resultados apresentados pelos vários modelos para μ(T) são bastante semelhantes, mas a maioria dos pesquisadores tem dado preferência às equações WLF (Eq. 18) e Vogel (Eq. 15).

Figura 7. Ajuste da dependência μ(T) com a equação WLF.



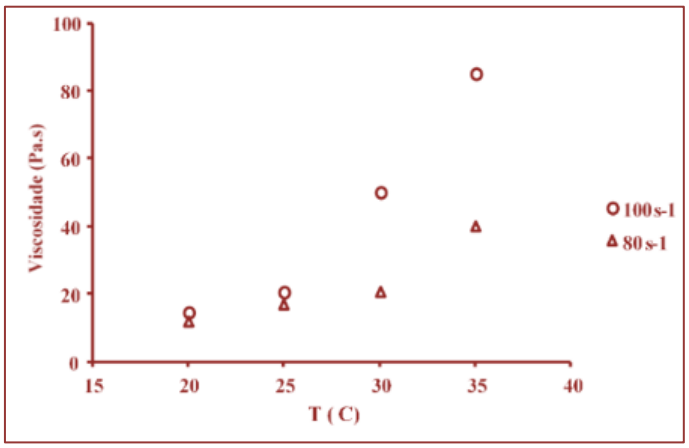
4.3. EFEITO DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE DA PASTA DE FOSFATO DE CÁLCIO

Devido ao envelhecimento da população, a osteoporose está se tornando um dos graves problemas médicos. A osteoporose leva a um aumento notável da incidência de fraturas ósseas. A operação tradicional com grandes feridas cirúrgicas está sendo substituída pela cirurgia minimamente invasiva. Foi demonstrado que o uso de injeção de cimento ósseo minimamente invasiva para estabilizar a osteoporose ou tratar fraturas do corpo vertebral tem um potencial clínico significativo. Além disso, com o desenvolvimento

de abordagens não invasivas, como a cirurgia percutânea, biomateriais diretamente injetáveis são necessários. O cimento ósseo à base de fosfato de cálcio tem sido considerado um material promissor para o reparo de defeitos ósseos devido à sua boa biocompatibilidade, excelente bioatividade, características de auto-endurecimento, baixa temperatura de endurecimento, rigidez adequada e capacidade de moldagem para qualquer geometria complicada (WANG; WANG; WANG; RAO, 2005).

Como mostrado na Figura 8, com o aumento da temperatura, a viscosidade da pasta de fosfato de cálcio aumentou significativamente. Este comportamento incomum ocorre porque o processo de dissolução-precipitação é acelerado quando a temperatura aumenta (SARDA, 2001). Observe que na Figura 7, a viscosidade é plotada contra 1/T. A viscosidade mudou apenas um pouco durante a hidratação à temperatura ambiente ou abaixo (25°C e 20°C), e a viscosidade aumentou rapidamente durante a hidratação quando a temperatura ambiente era mais alta (30°C e 35°C). Isso indica que as pastas de fosfato de cálcio podem ser preparadas à temperatura ambiente com boa fluidez para injeção e, após serem injetadas no corpo, endurecerão e se tornarão rígidas em pouco tempo. Esse desempenho torna conveniente para aplicações clínicas.

Figura 8. Efeito da temperatura na viscosidade de uma pasta de fosfato de cálcio com água deionizada em uma razão líquido/partícula de 0,5 ml/g. Adaptado de (WANG; WANG; WANG; RAO, 2005).



5. TIXOTROPIA

Tixotropia é um fenômeno não newtoniano dependente do tempo, caracterizado por uma diminuição na viscosidade aparente do material com o tempo de aplicação de uma taxa de deformação constante. Este fenômeno isotérmico e reversível é comum em sistemas com um líquido, como meio de dispersão, e um sólido, como fase dispersa, e ocorre devido à destruição gradual de alguma estrutura que foi criada pela atração das partículas da fase dispersa e cuja força de ligação não resiste à ação do cisalhamento imposto. Este fenômeno é considerado reversível porque a estrutura é reconstruída após a remoção do cisalhamento imposto (NAVARRO, 1989).

O processo de reconstrução das ligações é mais lento que o processo de destruição, portanto, leva mais tempo para que a viscosidade aparente inicial seja recuperada. Esse tempo, chamado tempo de relaxamento tixotrópico, τ, será maior quanto maior o tempo de aplicação e a magnitude do cisalhamento imposto.

Como a viscosidade aparente inicial do sistema fluido-sólido depende do teor de sólidos, conforme visto na seção de Reologia de Suspensões, haverá um número maior de ligações estruturais a serem quebradas com o aumento do teor de sólidos. Um número maior de ligações capazes de serem quebradas aumenta o caráter tixotrópico do sistema, conforme proposto pela Teoria Estrutural da Tixotropia de Vinogradov & Malkin (NAVARRO, 1997). Assim, quanto maior a concentração de partículas sólidas, maior a viscosidade aparente do sistema e maior a queda do valor de repouso para um determinado tempo sob a ação de uma taxa de deformação constante.

Se o grau de tixotropia for considerado como a diferença entre a viscosidade aparente inicial e a viscosidade em um determinado tempo de aplicação de cisalhamento, normalmente um tempo após o qual não há mais alteração na viscosidade aparente, chamado tempo de estabilização, um modelo como o proposto em Völtz, Nitsche, Heymann e Rehberg (2002), veja a Eq. 9, pode ser usado para ajustar a dependência η(t).

$$\eta(t) = ae^{-\tau/t} + \eta_{final} \qquad (9)$$

onde: a é um parâmetro de quebra de viscosidade; η_{final} é a viscosidade aparente do sistema no tempo de estabilização e τ é uma constante cinética de tempo

Pela teoria de Vinogradov & Malkin e modelo reológico como a Eq. 9, à medida que o teor de sólidos em um sistema disperso é aumentado, o sistema se torna mais viscoso e apresenta maior caráter tixotrópico. Assim, a diferença $\eta 0 - \eta final$ tende a $\eta 0$, viscosidade no tempo $t = 0$ (LABANDA; LLORENS, 2006).

5.1. SUSPENSÃO DE HIDROXIAPATITA

Hidroxiapatita (HA ou HAP) de origem biológica (coral, bovina ou derivada de algas marinhas) ou sintética são atualmente usadas para reparo ósseo e regeneração óssea na forma de grânulos, blocos e andaimes, por si só ou como compósito com polímeros ou outras cerâmicas ou como revestimentos em implantes ortopédicos ou dentários. Eles estão comercialmente disponíveis para uso em reparo, substituição e aumento ósseo e como andaimes em engenharia de tecidos para regeneração óssea. A justificativa para seu desenvolvimento como um material substituto ósseo é sua semelhança em composição com o mineral ósseo. HA também é usado como abrasivo para aumentar a rugosidade superficial de implantes metálicos e como material de origem para depositar revestimentos bioativos em implantes ortopédicos e dentários. Esses materiais também podem ser usados como agentes de transfecção, transportadores de medicamentos e dispositivos percutâneos. Biomateriais à base de HA ou HAP com propriedades melhoradas incluíram apatitas substituídas (LEGEROS; LEGEROS, 2008).

Estudos com suspensões de hidroxiapatita contendo dispersante [26] mostraram suspensões com maior viscosidade aparente para maiores teores de sólidos, como a maioria das suspensões, mas o crescimento da viscosidade aparente com o teor de sólidos, embora seguindo o modelo proposto na Eq. 7, foi maior em suspensões com maior concentração de dispersante. Todas as suspensões estudadas mostraram antixotropia. Esses comportamentos são completamente contrários ao proposto em vários trabalhos na literatura, nos quais o comportamento comum é a tixotropia, cujo caráter aumenta à medida que as partículas estão mais aglomeradas em repouso. A função do dispersante é manter as partículas afastadas e, assim, diminuir o impacto do aumento do teor de sólidos

na suspensão. Navarro & Alsina (1991) identificaram o comportamento pseudoplástico independente do tempo e o comportamento antixotrópico dependente do tempo em suspensões de alumina em PDMS. Como observado em Porsani, Trombini, Ana e Setz (2018), as suspensões têm sua viscosidade aparente aumentada com o tempo de aplicação de uma determinada taxa de deformação (comportamento antixotrópico). No entanto, ao atingir o equilíbrio, ou seja, quando a viscosidade aparente não varia mais com o tempo naquela taxa de deformação, um aumento na taxa de deformação causa uma diminuição imediata na viscosidade aparente (comportamento pseudoplástico). Isso leva à suposição de que as estruturas formadas pelas partículas dispersas durante a aplicação da taxa de deformação não resistem a futuros aumentos na taxa de deformação. Assim, a viscosidade aparente da suspensão aumenta com o tempo e diminui com a taxa de deformação.

6. CONCLUSÃO

A reologia de biomateriais e materiais biológicos é um campo complexo e multifacetado, com implicações significativas para a medicina e a indústria. Este artigo destacou a importância de compreender as propriedades reológicas desses materiais para otimizar seu desempenho em diversas aplicações.

As propriedades não newtonianas e tixotrópicas observadas em muitos biomateriais, como géis poliméricos e suspensões de hidroxiapatita, exigem uma análise cuidadosa para garantir sua eficácia em aplicações como liberação de fármacos e reparo ósseo. A influência da temperatura na viscosidade de pastas de fosfato de cálcio, por exemplo, destaca a necessidade de controle preciso durante a preparação e aplicação desses materiais em procedimentos cirúrgicos.

No caso do sangue humano, a complexidade de sua reologia, influenciada pela deformabilidade dos glóbulos vermelhos e pela presença de proteínas plasmáticas, exige uma modelagem precisa para simular o fluxo sanguíneo em diferentes condições fisiológicas e patológicas.

A pesquisa contínua nesta área é essencial para o desenvolvimento de biomateriais inovadores e para a melhoria de técnicas de diagnóstico e tratamento. A combinação de estudos experimentais e modelagem computacional pode fornecer insights valiosos sobre o comportamento reológico desses materiais, abrindo caminho para avanços significativos na medicina e na engenharia de tecidos.

REFERÊNCIAS

[1] BAUMLER, H.; NEU, B.; DONATH, E. A.; KIESEWETTER, H. Basic Phenomena of Red Blood Cell Rouleaux Formation. Biorheology, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 439-442, 1999.

[2] DUAN, P.; KANDEMIR, N.; WANG, J.; CHEN, J. Rheological Characterization of Alginate Based Hydrogels for Tissue Engineering. *MRS Advances*, [S. l.], v. 2, n. 61, p. 3737-3742, 2017. doi:10.1557/adv.2017.8

[3] FERRY, J. D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. New York: J. Wiley & Sons, 1980.

[4] FUNG, Y. C. *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

[5] GAEHTGENS, P. In Vitro Studies of Blood Rheology in Microscopic Tubes. In: GROSS, D. R.; HWANG, N. H. C. (Eds.). *The Rheology of Blood, Blood Vessels and Associated Tissues*. Alphen Van Den Rijn, The Netherlands: Sijthoff and Noordhoff, 1981. p. 257-275.

[6] GAEHTGENS, P.; SCHMID-SCHÖNBEIN, H. Mechanisms of Dynamic Flow Adaptation of Mammalian Erythrocytes. *Naturwissenschaften*, [S. l.], v. 69, n. 6, p. 294-296, 1982.

[7] KANG, I. S. A Microscopic Study on The Rheological Properties of Human Blood in The Low Concentration Limit. *Korea-Australia Rheology Journal*, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 77-86, 2002.

[8] LABANDA, J.; LLORENS, J. A structural model for thixotropy of colloidal dispersions. *Rheologica Acta*, [S. l.], v. 45, n. 3, p. 305-314, 2006.

[9] LEGEROS, R. Z.; LEGEROS, J. P. Bioceramics and their Clinical Applications. In: *An Introduction to Bioceramics*. [S. l.]: World Scientific, 2008. p. 139-180.

[10] LEWIS, G.; CARROLL, M. Rheological Properties of Acrylic Bone Cement during Curing and the Role of the Size of the Powder Particles. *Journal of Biomedical Materials Research*, [S. l.], v. 63, n. 2, p. 191-199, 2002.

[11] NAVARRO, R. F. *Fundamentos de Reologia de Polímeros*. Caxias do Sul, Brasil: EDUCS, 1997.

[12] NAVARRO, R. F. *Mecânica dos Biomateriais*. Beau Bassin, Maurício: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

[13] NAVARRO, R. F. Reologia de Suspensões Concentradas de Alumina em Polidimetilsiloxano (Dissertação de Mestrado). CCT-UFPB, Paraíba, Brasil, 1989.

[14] NAVARRO, R. F.; ALSINA, O. L. S. de. Influência Da Concentração De Alumina Nas Propriedades Reológicas. De Suspensões De Alumina Em PDMS. Parte II: Antitixotropia. *Revista Brasileira De Engenharia*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 79-91, 1991.

[15] PORSANI, N. K.; TROMBINI, V.; ANA, P. A.; SETZ, L. F. G. Rheological evaluation of hydroxyapatite. *Cerâmica*, [S. l.], v. 64, n. 371, p. 325-330, 2018.

[16] SARDA, S. Temperature dependence of setting reaction and compressive strength of calcium phosphate bone cement. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, [S. l.], v. 12, n. 10-12, p. 905-911, 2001.

[17] SECOMB, T. W. Red Cell Mechanics and Blood Flow. *Cell Biophysics*, [S. l.], v. 21, n. 2-3, p. 231-251, 1992.

[18] TAGER, A. *Physical Chemistry of Polymers*. Moscow: Mir Publishers, 1978.

[19] VINOGRADOV, G. V.; MALKIN, A. Ya. *Rheology of Polymers*. Moscow: Mir Publishers, 1980.

[20] VITKOVA, V.; FARUTIN, A.; POLACK, B.; MISBAH, C.; PODGORSKI, T. Erythrocyte Dynamics In Flow Affects Blood Rheology. *Journal of Physics: Conference Series*, [S. l.], v. 398, p. 012027, 2012.

[21] VITKOVA, V.; MADER, M.; MISBAH, C. M.; PODGORSKI, T. Rheology of Dilute Suspensions of Vesicles and Red Blood Cells. *Academia*, [S. l.], p. 1-4, 2020.

[22] VÖLTZ, C.; NITSCHE, M.; HEYMANN, L.; REHBERG, I. Thixotropy in Macroscopic Suspensions of Spheres. *arXiv preprint cond-mat/0202243*, 2002.

[23] WANG, X. P.; WANG, J. D.; WANG, Y. J.; RAO, P. G. Effect of Temperature on the Viscosity of Calcium Phosphate Paste. *Key Engineering Materials*, [S. l.], v. 288-289, p. 557-560, 2005.

[24] WANG, L.-H.; PORTER, R. S. Miscibility of a Polyarylate with a Liquid Crystalline Copolyester. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, [S. l.], v. 31, n. 9, p. 1067-1073, 1993.

[25] YILMAZ, F.; GUNDOGDU, M. Ya. Ar. A Review on the Blood Rheology. *Korea-Australia Rheology Journal*, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 197-211, 2008.

[26] ZAVYALOVA, O.; GAJEWSKA, S.; DĄBROWSKA-WISŁOCKA, D.; SIONKOWSKA, A. Characteristics of Physicochemical and Rheological Properties of Chitosan Hydrogels Based on Selected Hydroxy Acids. *Engineering of Biomaterials*, [S. l.], v. 161, p. 2-7, 2021.

[27] ZYDNEY, A. L.; OLIVER, J. D.; COLTON, C. K. A Constitutive Equation for The Viscosity of Stored Red Blood Cell Suspensions: Effect of Hematocrit, Shear Rate, And Suspending1 Phase. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 35, n. 8, p. 1639-1680, 1991.

@editorapoisson

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

https://www.facebook.com/editorapoisson